

**CARACTERIZACIÓN DE ALGUNAS ROCAS PREDOMINANTES EN LA
PROVINCIA DE SUGAMUXI, POR EL MÉTODO DE ULTRASONIDO**

DAYANA YINETH TAPIA ORTEGA

**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SEDE SECCIONAL SOGAMOSO
ESCUELA DE INGENIERIA DE MINAS
SECCIONAL SOGAMOSO
2018**

**CARACTERIZACIÓN DE ALGUNAS ROCAS PREDOMINANTES EN LA
PROVINCIA DE SUGAMUXI, POR EL MÉTODO DE ULTRASONIDO**

DAYANA YINETH TAPIA ORTEGA

**PROPUESTA DE PROYECTO DE GRADO PRESENTADA PARA OPTAR EL
TÍTULO A INGENIERO DE MINAS**

MONOGRAFIA: PROYECCIÓN TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DIRECTOR DEL PROYECTO:

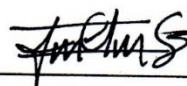
**JAIRO MARTIN ESPITIA LOPEZ
INGENIERO CIVIL
Ph.D EN INGENIERIA**

CODIRECTOR:

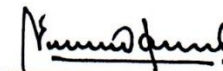
**WILDER OCAMPO OCHOA
INGENIERO DE MINAS
M.sc. (c) EN GEOTECNIA**

**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SEDE SECCIONAL SOGAMOSO
ESCUELA DE INGENIERIA DE MINAS
SECCIONAL SOGAMOSO
2018**

Nota de aceptación



Director de proyecto



Presidente de jurado



Jurado



Jurado

Sogamoso, (23 mayo 2018)

DEDICATORIA

Llena de alegría, amor y esperanza, dedico este proyecto antes que nada a Dios por darme la oportunidad y la sabiduría para alcanzar este gran logro.

Es para mí una gran satisfacción poder dedicar este triunfo a mis Padres, RAMIRO TAPIA ROMERO “pollí de mí vida” y DAISY ORTEGA MENESES “la seño de mí alma” quienes han sido mis pilares y mi motivación en este duro, pero bello camino. Gracias por hacerme sentir una hija digna de ustedes; por regalarme su eterno amor y comprensión.

A mis hermanos DAISY MILETH, SORITH LORAINE Y LUIS ANTONIO “El cuquillo” quienes me han apoyado siempre y han puesto su grano de arena para este triunfo.

Sin dejar atrás a toda mi familia; abuelos NELLY & ANTONIO, tíos en el cielo WILTON, en la tierra MALBIS, JAINER, CARLITOS Y mis PRIMAS gracias por ser parte de mi vida y permitirme ser parte de su orgullo.

A la hermana que me regalo la U.P.T.C; KIARY GABRIELA MONTERO por aguantarme y hacer que mi estancia en la universidad fuera la experiencia más divertida, muchas gracias por todo ESPELUCA’.

A LIZ ESCOBAR, HEINER, OSCARCITO, JOE, WILDER, MAFE R., LEINER, LAURA T., LILI T., CARMENCITA por cada uno de los momentos que compartieron conmigo y por ese apoyo incondicional en el transcurso de esta etapa.

Y por último a la Sra. ELENA CHISICA RODRIGUEZ por hacerme parte de su familia acogiéndome como su hija y aguantarme todos caprichos y pataletas que me daban.

**¡DE CORAZÓN MUCHAS GRACIAS A TODOS, LOS AMO
INFINITAMENTE!**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a DIOS por su inmenso amor y por no dejarme decaer en momentos que sentía que mis esfuerzos no eran suficientes.

Agradezco a AURITA QUIJANO por estar siempre dispuesta a ayudarnos en todo lo que necesitamos, y aguantarse que le perturbara la dicha frecuentemente.

A él Doctor JAIRO MARTIN ESPITIA LÓPEZ, por dirigir este proyecto de la mejor manera posible.

A él ING. RAFAEL ESPITIA por su colaboración y disposición durante el transcurso del proyecto.

A JAVIER SILVA, CRISTIAN GUERRA y MELQUISEDEC USCATEGUI por la ayuda incondicional en la toma de muestras.

A DAIRO MENDIVIL por su apoyo en la realización de los ensayos.

A la ingeniera LAURA BARRANTES y CARLOS VARGAS por su colaboración.

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y en especial a la Escuela de Ingeniería de Minas por todos estos años de conocimiento.

Y por último a todos los profesores y compañeros que en el transcurso de esta etapa de mi vida me han brindado su apoyo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	14
GENERAL.....	14
ESPECIFICOS.....	14
3. GENERALIDADES	15
3.1 LOCALIZACIÓN.....	15
3.1.1 vías de acceso.....	15
3.2 GEOLOGÍA	19
3.2.1 Geología general.....	19
3.2.2 Geología local	20
4. TECNICAS DE ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS	28
4.1 REVISIÓN BIBLIOGRAFICA	28
4.2 TRABAJO EN EL ÁREA.....	28
4.3TRABAJO DE LABORATORIO.....	29
4.3.1 PREPARACION DE MUESTRAS	29
4.3.2 Condicionamiento de especímenes a diferentes condiciones de humedad	34
4.3.3 Medición de velocidad de propagación de onda	37
5. DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA MACROSCOPICA DE CADA LITOLOGIA DE ESTUDIO.	43
5.1 CALIZA.....	43
5.2 ARENISCA	44
5.3 MINERAL HIERRO	44
6. ENSAYO DE ULTRASONIDO	45
6.1 INTERPRETACIÓN DE SEÑALES PARA EL CALCULO DE VELOCIDAD DE ONDA	45
6.1.1 Estado natural de las rocas	45
6.1.2 Estado seco	47
6.1.3 Estado saturado.....	48
6.2 VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN DE ONDA PARA CADA LITOLIGIA DE ESTUDIO.....	49
6.2.1 Efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda y Anisotropía	49
6.2.1.1 Efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda en la roca caliza	50

6.2.1.2 Anisotropía para la caliza	52
6.2.2 Efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda en la arenisca.	53
6.2.2.1 Anisotropía para la arenisca.....	55
6.2.3 Efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda en el mineral de hierro. ..	56
6.2.3.1 Anisotropía para el mineral de hierro.....	58
6.3 EFECTOS DE LA HUMEDAD EN PARÁMETROS DINÁMICOS A BAJOS NIVELES DE DEFORMACIÓN.	59
6.3.1 Efectos de la humedad en parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para la roca caliza.	59
6.3.2 Efectos de la humedad en parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para areniscas.	61
6.3.3 Efectos de la humedad en parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para el mineral de hierro.	63
CONCLUSIONES.....	66
RECOMENDACIONES.....	67
BIBLIOGRAFÍA	68
ANEXOS	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de muestras.....	29
Tabla 2. Medidas de calizas paralelas al estrato en estado natural.....	31
Tabla 3. Medidas de calizas perpendiculares al estrato en estado natural.....	32
Tabla 4. Medidas de areniscas paralelas al estrato en estado natural.....	32
Tabla 5. Medidas de areniscas perpendiculares al estrato en estado natural.....	33
Tabla 6. Medidas de mineral de hierro paralela al estrato en estado natural.....	33
Tabla 7. Medidas de mineral de hierro perpendicular al estrato en estado natural.	34
Tabla 8. Medida muestras en estado natural.....	35
Tabla 9. Medida de muestras en estado seco.	35
Tabla 10. Medida de muestras en estado saturado.	36
Tabla 11. Clasificación del grado de anisotropía de las rocas (Saroglou & Tsiambaos, 2006).	50
Tabla 12. .efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda para las calizas P.....	50
Tabla 13. .efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda para las calizas PP.....	51
Tabla 14. Evaluación de Anisotropía en cada estado para la caliza.....	53
Tabla 15. efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda para las areniscas P.	53
Tabla 16. Efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda para las areniscas PP.....	54
Tabla 17. Evaluación de Anisotropía en cada estado para la arenisca.....	55
Tabla 18. Efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda para el mineral de hierro P.....	56
Tabla 19. Efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda para mineral de hierro PP.	57
Tabla 20. Evaluación de Anisotropía en cada estado para la arenisca.....	58
Tabla 21. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para la caliza P.	59
Tabla 22. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para la caliza PP.	60
Tabla 23. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para Las areniscas P.	62
Tabla 24. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para las areniscas PP.....	63
Tabla 25. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para el mineral de hierro P.	64
Tabla 26. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para el mineral de hierro PP.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la zona de estudio.	18
Figura 2. Columna estratigráfica de la formación Tibasosa	21
Figura 3. Columna estratigráfica, formación Picacho.....	24
Figura 4. columna estratigráfica formación Concetración	27
Figura 5. Definición de la orientación de medición de la velocidad de propagación de onda.....	38
Figura 6. Visualización de parámetros de salida.....	39
Figura 7. Resultado de ensayo de ultrasonido para roca caliza en estado natural paralelo al estrato.	46
Figura 8. Resultado de ensayo de ultrasonido para roca caliza en estado natural perpendicular al estrato.....	46
Figura 9. Resultado de ensayo de ultrasonido para arenisca en estado seco paralelo al estrato.	47
Figura 10. Resultado de ensayo de ultrasonido para arenisca en estado seco perpendicular al estrato.....	47
Figura 11. Resultado de ensayo de ultrasonido para mineral de hierro en estado saturado paralelo al estrato.....	48
Figura 12. Resultado de ensayo de ultrasonido para mineral de hierro en estado saturado perpendicular al estrato.....	48

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Vía de acceso Sogamoso- Nobsa	16
Imagen 2. Vía de acceso Sogamoso- La Ramada	16
Imagen 3. Vía de acceso Sogamoso- Paz de Rio	17
Imagen 4. Toma de muestras en campo	28
Imagen 5. Extracción de núcleos.	30
Imagen 6. Muestras preparadas.....	30
Imagen 7. Medición del peso de la muestra.	31
Imagen 8. Muestras en el horno.....	34
Imagen 9. Muestras en saturación	34
Imagen 10. Equipo de ultrasonido	37
Imagen 11. Montaje de la muestra en el equipo de ultrasonido.	38
Imagen 12. Vistas estereográfica de roca caliza.....	43
Imagen 13. Vistas estereográfica de areniscas.....	44
Imagen 14. Vistas estereográfica de mineral de hierro.	44

LISTA DE GRAFICOS

Grafico 1. Velocidades de propagación de onda vs humedad gravimétrica para la calizas P.....	51
Grafico 2. Velocidad de propagación de onda vs humedad gravimétrica para la calizas PP.	52
Grafico 3. Velocidad de propagación de onda vs humedad gravimétrica para las areniscas P.	54
Grafico 4. Velocidad de propagación de onda vs humedad gravimétrica para las areniscas PP.....	55
Grafico 5. Velocidad de propagación de onda vs humedad gravimétrica para el mineral de hierro P.....	57
Grafico 6. Velocidad de propagación de onda vs humedad gravimétrica para el mineral de hierro PP.	58
Grafico 7. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación vs Humedad para la caliza P.....	60
Grafico 8. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación vs Humedad para la caliza PP.	61
Grafico 9. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación vs Humedad para las areniscas P.....	62
Grafico 10. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación vs Humedad para las areniscas PP.	63
Grafico 11. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación vs Humedad para el mineral de hierro P.....	64
Grafico 12. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación vs Humedad para el mineral de hierro PP.	65

RESUMEN

Se realizó una caracterización de algunas rocas predominantes en la provincia de Sugamuxi, por el método de ultrasonido. Así mismo hace énfasis en el efecto de la humedad en las propiedades dinámicas (V_p, V_s) y las propiedades dinámicas a bajos niveles de deformación (Modulos de Young's, Modulos Bulk, Modulos Rigidity).

Estos indicadores fueron empleados y comparados para mostrar la relación y diferencia entre los dos tipos de orientación, (paralelo y perpendicular) a la estratificación, puesto que estos indicadores permiten observar la variación entre las propiedades relacionadas.

Partiendo de estos valores se logró evaluar el grado de anisotropía de cada una de las rocas de estudio, estos datos analizados sugieren que a pesar de tener litologías diferentes, están dentro del mismo rango (pobremente anisotrópicas).

INTRODUCCIÓN

La provincia de Sugamuxi cuenta con una geología diversa, donde se hacen presentes distintas formaciones de importancia económica para el sector minero; formaciones cuyas edades oscilan entre el Cretáceo y terciario.

El potencial de explotación minera (superficial y subterránea) de estas formaciones es alto, y los estudios realizados hasta el momento han utilizado técnicas convencionales, como ensayos de compresión simple, para determinar algunas de sus propiedades, es importante implementar otras técnicas que permitan determinar parámetros adicionales a los que brinda el ensayo de compresión ; por tal motivo, para este estudio se utilizó una técnicas no destructivas (ultrasonido), que permitio observar y analizar detalladamente el comportamiento en estos materiales con base a la composición mineralógica, la anisotropía y la humedad.

En el desarrollo de este proyecto se caracterizaron las rocas predominantes de las formaciones: Tibasosa, miembro superior, correspondiente a bancos de caliza, Picacho (areniscas) y Concentración (mineral de hierro); permitiendo conocer las propiedades dinámicas, y las dinámicas a bajos niveles de deformación de estas rocas, por medio de una técnica no convencional, por el método de ultrasonido.

OBJETIVOS

GENERAL

Caracterizar dinámicamente algunas rocas sedimentarias de la formación Tibasosa, Picacho y Concentración, para ciertos sectores de la provincia de Sugamuxi utilizando el método de ultrasonido.

ESPECIFICOS

- Evaluar el efecto de la humedad en la velocidad de propagación de ondas P y S y algunas propiedades dinámicas de las rocas sedimentarias de estudio.
- Estudiar la influencia de la composición mineralógica en la velocidad de propagación de ondas P y S.
- Estudiar el grado de anisotropía de las rocas de estudio por el método de ultrasonido.

3. GENERALIDADES

3.1 LOCALIZACIÓN

Las zonas de estudio se encuentran localizadas dentro de la provincia de Sugamuxi, donde se tomarán unos puntos específicos de la provincia ubicados en los municipios de Tibasosa, Sogamoso y Paz del Río (ver cuadro 1); en cada uno de estos puntos referenciados se medirá un radio de 30 m. para realizar la toma de muestras (ver figura 1); estos puntos se eligieron por presentar afloramientos adecuados para el muestreo, debido a que en ellos existe una mejor exposición de las rocas y fácil acceso.

Cuadro 1. Coordenadas

PUNTO	FORMACIÓN	COORDENADA N	COORDENADA E
1	Tibasosa (caliza)	1°123.710	1°121.550
2	Picacho (areniscas)	1°125.380	1°129.050
3	Concentración (minera de hierro)	1°146.000 1°149.500	1°156.000 1°158.500

Fuente: Autora del proyecto

Para la toma de coordenadas fue utilizado el sistema de Magna Sirgas.

3.1.1 vías de acceso

Punto 1.

La ruta de acceso a la formación Tibasosa desde la UPTC es a través de la carrera 20 hasta llegar a la antigua plaza de mercado de mayoristas, y a continuación se transita por la diagonal 13 (vía Siatame - Nobsa) por la cual se llega directamente a la cantera de calizas. (Ver imagen 1).

Imagen 1. Vía de acceso Sogamoso- Nobsa

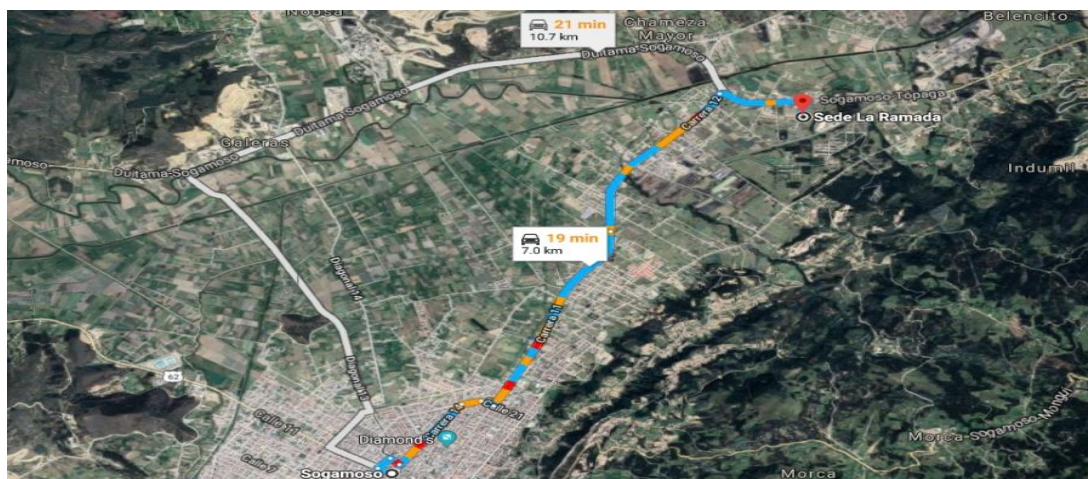


Fuente. Google Maps

Punto 2.

En la figura 2 se describe la vía de acceso desde la UPTC a la cantera de arenisca ubicada en la vereda la Ramada – Sogamoso, para ingresar a la zona de estudio se transita por las carreras 11 y 12 llegando a la sede centro recreacional “La Ramada”, luego se toma un desvío hacia la izquierda de 500 m aproximadamente por carretera en regular estado.

Imagen 2. Vía de acceso Sogamoso- La Ramada

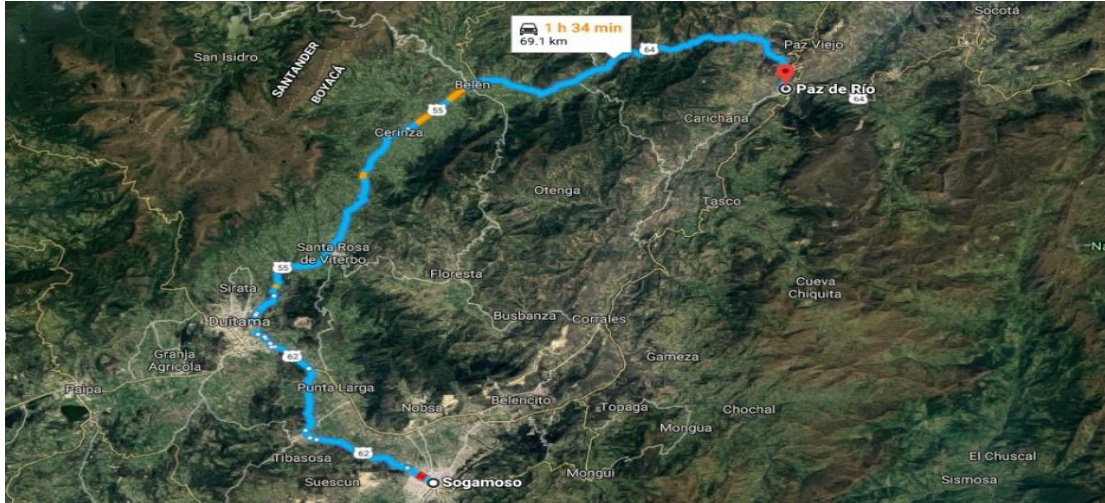


Fuente. Google Maps

Punto 3.

La zona de estudio se encuentra localizada a unos 5 Km, sobre la vía que de la población de Paz del Rio conduce a Belén, a una altura promedio de 2300 m.s.n.m. la región cuenta con vías carreteables que la comunican con el municipio de Sogamoso, recorriendo los municipios de Tasco, Corrales y la que comunica Paz del Rio- Belén- Duitama.

Imagen 3. Vía de acceso Sogamoso- Paz de Rio



Fuente. Google Maps

Figura 1. Localización de la zona de estudio.



Fuente. Plancha 172 Paz del Rio 1998 IG

3.2 GEOLOGÍA

3.2.1 Geología general

LA SERIE CRETACICO-TERCIARIA

La ingesión marina del cretáceo Inferior marca el inicio de una potente serie sedimentaria, que sigue a un prolongado período de erosión de la región.

El Cretáceo Inferior y Medio, que es exclusivamente de origen marino, alcanzan los 1.600 m de espesor y consta de las formaciones Tibasosa, Belencito, y Une. El cretáceo Superior, que es predominantemente marino, excepto por su parte superior que incluye depósitos de transición, llega a los 1.300 metros de espesor y está constituido por las formaciones Churuvita, Conejo, Ermitaño y Guaduas.

No se observa discordancia entre el Cretáceo y el Terciario y el paso es gradual, haciendo difícil la identificación del límites exacto. Sin embargo, con buena aproximación este límite puede colocarse en el contacto entre la formación Guaduas y la formación Socha Inferior, como se verá más adelante.

Los depósitos del Terciario, que son preferentemente continentales, tienen una potencia de cerca de 2.000 m y están representados por las formaciones Socha Inferior, Socha Superior, Picacho y Concentración¹.

¹ Plancha 172 de INGEOMINAS

3.2.2 Geología local

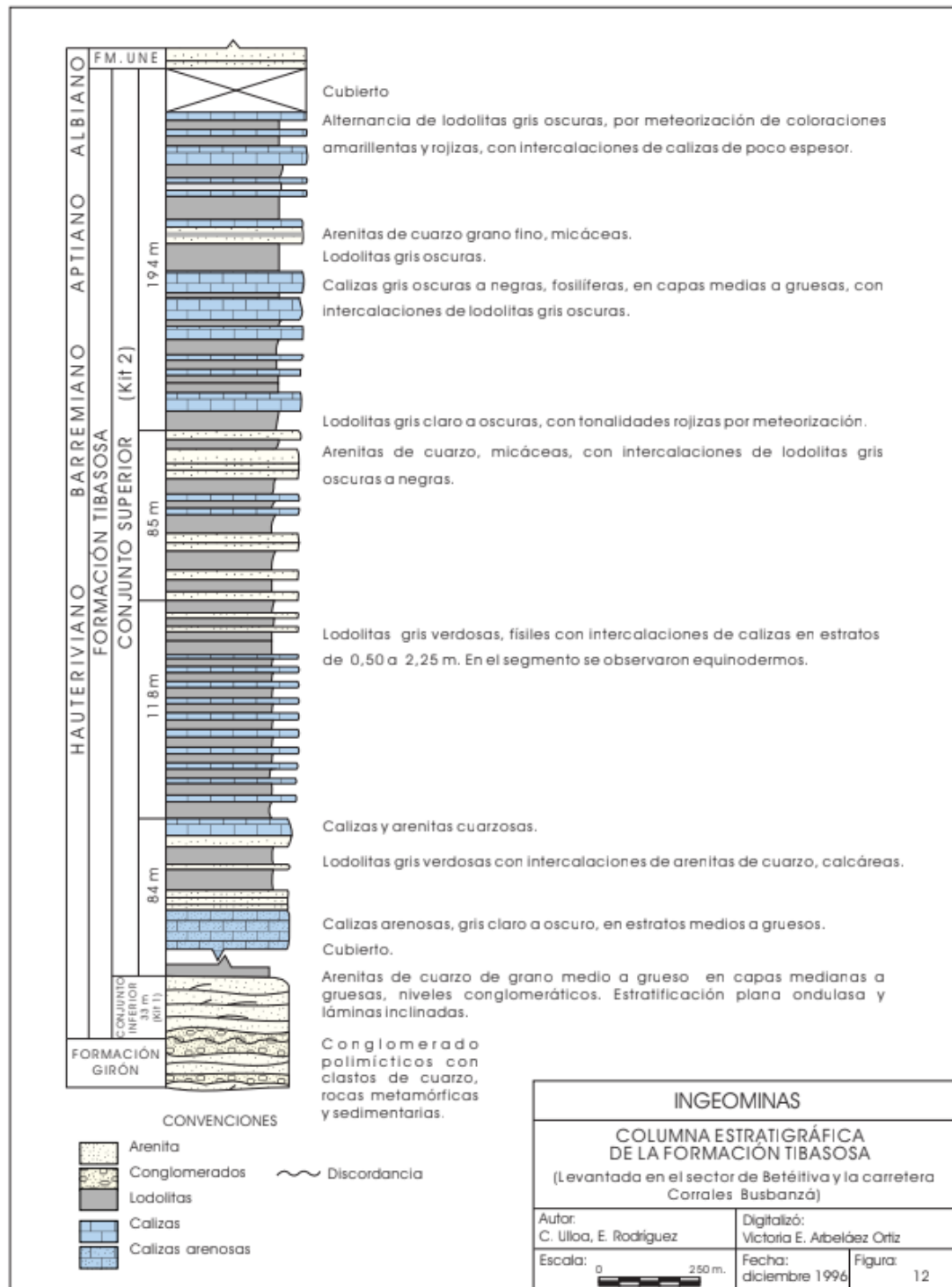
FORMACIÓN TIBASOSA (Kit₂): con este término se indica aquí un conjunto de estratos que corresponden al “miembro calcáreo superior” de la formación Tibasosa. El motivo para elevar a rango de formación de este conjunto obedece a que su mejor exposición se observa entre Belencito y Chámeza, mostrando características litológicas y geomorfológicas propias. Además, en la región estudiada esta unidad tiene importancia industrial y es precisamente en Belencito donde ha sido investigada con detalles en corte y testigos de perforación.

LITOLOGIA: la parte inferior consta de 30 m de arcillolitas negruzcas y algunos niveles arenosos, seguidos por bancadas de arenisca cuarcítica que pueden alcanzar los 80 m. de espesor. Sobre estas yace una serie netamente calcárea constituida por una continua alternancia de bancos de caliza, margas, arcillolitas calcáreas y areniscas. Una zona arcillosa de unos 80 m. de espesor separa la serie calcárea en dos conjuntos, fácilmente reconocibles en la región por la topografía abrupta que ocasionan. Los 20 m superiores están formados por arcillolitas negras fisibles, que se tornan gris claro hacia el techo. Los principales bancos de caliza son 10, con espesores entre 4 y 17 m. El banco superior mas importante, denominado Banco “B” en la industria cementera local, es genéticamente una biomicrita compuesta en promedio por un 54% de calcita microcristalina, un 43% de elementos aloquímicos (fragmentos de fósiles) y 3% de material terrígeno (cuarzo, arcilla).

- **ESPESOR:** en la sección de Belencito la formación alcanza los 550 m, valor que se mantiene constante en todo el borde occidental del valle de Sogamoso. Sin embargo, parece que algunos niveles se adelgazan sensiblemente hacia el noroeste.
- **LIMITES ESTRATIGRAFICOS:** la base de la formación Belencito indica una edad que va del Barremiano Superior probablemente hasta el Albiano Superior. El ambiente de sedimentación es indiscutiblemente marino a juzgar por los fósiles de Amonitas, Gatreopodos, lamelibranquios, Equinidos, Peces, etc. Cuyas características presuponen unas facies nerítica. Sin embargo, la parte extrema superior muestra evidencias de transición ambiental por la existencia de huellas fósiles de hojas.
- **CORRELACIONES:** la formación Belencito corresponde a los miembros Tibu y aguardiente de la formación Uribante en Norte de Santander y la Formación, meque del oriente del oriente de la Sabana de Bogotá².

² Ibid 1

Figura 2. Columna estratigráfica de la formación Tibasosa



Fuente. Plancha 172 de INGEOMINAS

FORMACIÓN PICACHO (PgP): este es el nombre dado por ALVARADO B. y SARMIENTO R. (1944) a las areniscas que forman el cerro de Picacho, en el alto de El Portillo, al noreste del urbano de Paz de Rio.

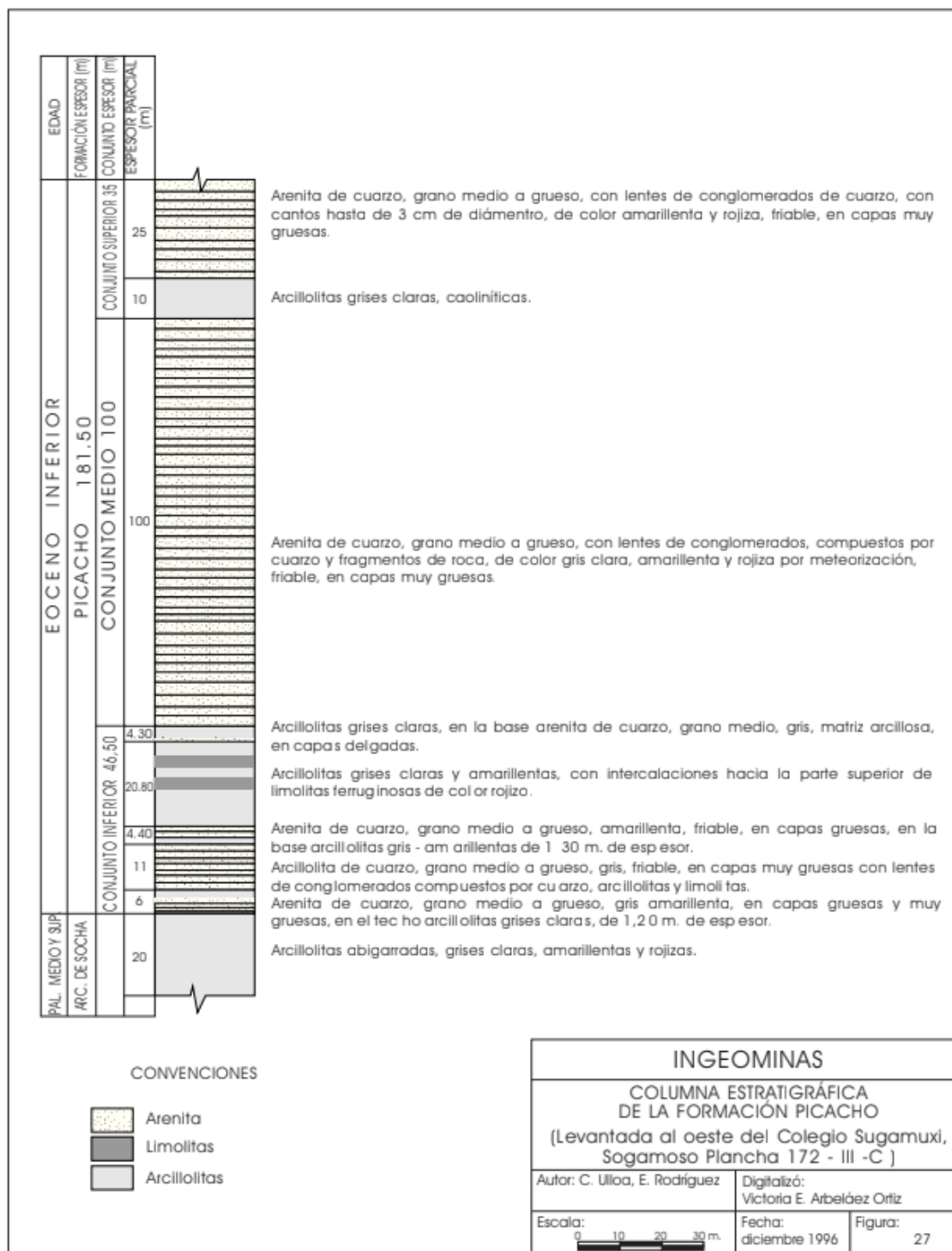
- **LITOLOGIA:** la formación Picacho es predominantemente arenosa. Las areniscas son de color blanco a pardo, bastante limpias, masivas, moderadamente duras friables, de grano fino a grueso, con niveles conglomeraticos. El miembro inferior consta de gruesos bancos de arenisca (las bancadas en algunos casos pueden alcanzar los 50m), que siendo muy porosa frecuentemente tiene zonas impregnadas de asfalto. Las areniscas presentan marcas de corrientes, estratificación cruzada y otras estructuras de sedimentación. El miembro superior está constituido hasta en un 60% de arcillolita, en parte arenosa, con dos intercalaciones importantes de arenisca. El techo está formado por una arcillolita habana compacta muy característica, denominada “alfandoque” por los mineros de Paz de Rio. Existen variaciones laterales, por lo que las areniscas pueden variar de posición dentro de este miembro. En el sector de la Chapa las arcillolitas son blandas,, plásticas, de color rojo o rosado, a veces gris moteado de rojo, en dos niveles separados por un banco de 15 m de arenisca blanca, friable, de grano medio, bien calibrado y con estratificación cruzada muy marcada./ ALVARADO B. y SARMIENTO R. incluyen todo este conjunto en la formación Concentración; sin embargo, la facies de las areniscas presentes en este intervalo es idéntica a la de la bancada inferior y las arcillolitas son similares a las del Socha Superior, muy diferentes a las del Concentración, incluso en su alteración y morfología. Por tal razón aquí se coloca este conjunto dentro de la formación Picacho con el nombre de “Miembro de Mesa Alta”, localidad al oriente de Paz de Rio donde aflora la sección completa.
- **ESPESOR:** La formación presenta un espesor variables entre 180 y 220 m. En general, el conjunto inferior de areniscas masivas muestra una potencia entre 90 y 110 m. En el cerro de Siberia al noreste de Paz de Rio el espesor total es de 208 m y la arenisca principal del miembro superior descansa sobre el inferior formando todo un conjunto compacto de areniscas de 125 m de potencia. el miembro inferior es de gran continuidad regional y puede identificarse morfológicamente por los abruptos escarpes que forman las areniscas.
- **LIMITES ESTRATIGRAFICOS:** el límite inferior se localiza en el contacto entre las areniscas masivas y las arcillolitas verdosas de la formación Socha

Superior. En los sitios donde es observable este contacto no hay evidencia de discordancia. EL límite superior marca el paso a las areniscas ferruginosa de base de la formación Concentración.

- **EDAD Y ORIGEN:** la formación Picacho es del Eoceno Inferior. El origen de esta formación es continental, depositada en un ambiente posiblemente de tipo deltaico, de gran extensión lateral.
- **CORRELACIÓN:** la formación Picacho equivale a las “Areniscas de Lenguazaque” (VAN DER HAMMEN, 1957), que representa el nivel arenoso inferior de la formación de Bogotá, y se correlaciona bien con la formación Mirador de Norte de Santander³.

³ Ibid 1

Figura 3. Columna estratigráfica, formación Picacho



Fuente. Plancha 172 de INGEOMINAS

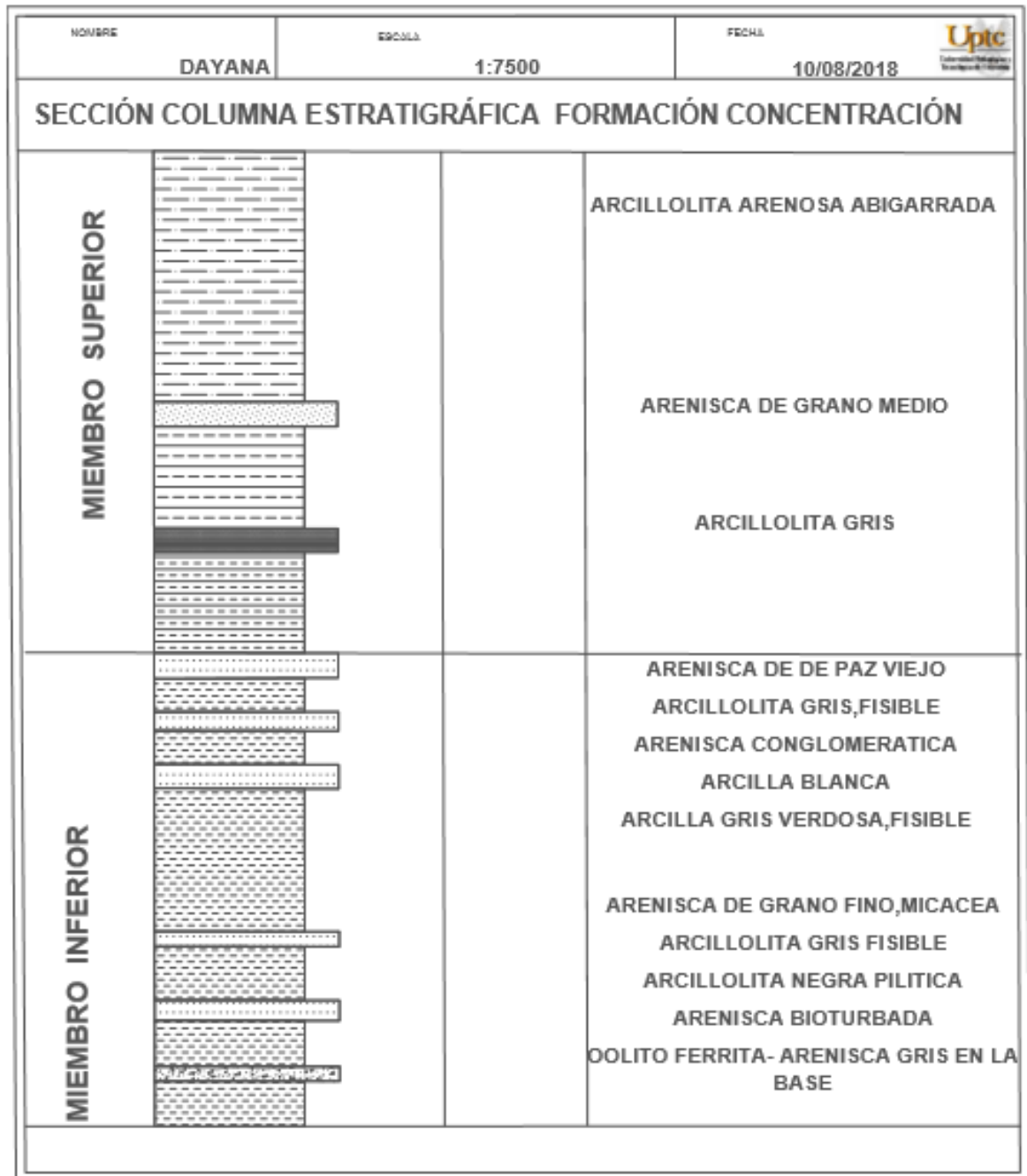
FORMACIÓN CONCENTRACIÓN (Pgc): la denominación fue dada por ALVARADO B. y SARMIENTO R. (1944) a la sección que aflora en los alrededores del caserío de concentración, sobre la carretera Belén- Paz de Río.

- **LITOLOGIA:** la formación Concentración puede dividirse en dos conjuntos. El inferior presenta en la base una arenisca gris de grano fino, de uno a dos metros de espesor, sobre la que yace un banco mineral de hierro oolítico rojizo de 2 a 12 m de potencia. Sobre el mineral descansa un conjunto de 150 m de arcillolitas negruzcas, piriticas, con rastros carbonosos de vegetales y una arenisca de grano fino, con sedimentación bioturbada (Arenisca Crespa), localizada 60 m por encima del banco de mineral. Siguen 110 m de arcillolita pizarrosa gris con intercalaciones importantes de areniscas de grano fino, micácea, y algunas cintas de lignito. Sobre esta parte yacen 150 m de arcillolitas fisibles gris- verdosas con frecuentes intercalaciones de bancos delgados de areniscas de grano fino, arcillosa, especialmente en la porción inferior. Es característica la abundancia de cristales y costras de yeso. Encima se hallan 75 m de arcillas arenosas blancas, plásticas, con abundantes siderita en esferulas de 1mm, en la que se intercala un banco lenticular de arenisca de grano grueso, con niveles conglomeraticos. La sección culmina con 110 m de arcillolitas fisibles grises, en cuya parte superior se intercalan 5 bancos de arenisca masiva (arenisca de sedimentación). El conjunto superior consta principalmente de arcillolitas grises con constantes intercalaciones de bancos de areniscas de grano medio. La parte superior esta limitada por la gran falla de Soapaga, lo que no permite un reconocimiento claro de la estratigrafía de los niveles mas altos de la formación . en el área de Belencito se observa, al contacto por falla con las rocas antiguas, una sección de areniscas rojizas lenticulares entremezcladas con arcillolitas arenosas abigarradas, de sedimentación muy disturbada, que respresenta tal vez el horizonte final de la formación Concentración al iniciarse la orogenia. Cerca de la confluencia de la Qda. Colorada se observa un delgado estrato de oolita ferrifera arenosa, (similar a otro banquito oolítico presente 20 m por encima del mineral principal), probablemente de distribución local. En algunos sitios existen cintas irregulares de lignito, o hacia la base o en la zona media de este conjunto.
- **ESPESOR:** el espesor total de la formación Concentración, en la región de Paz de Río, es de aproximadamente 1.400m . este valor es variable debido a las omisiones producidas por la falla de Soapaga. El conjunto inferior, que es el mejor conocido, alcanza los 620 m de espesor en el sector de las minas de hierro de Paz de Río.

- **LIMITES ESTRATIGRAFICOS:** Aquí se considera como base de la formación concentración el piso de la arenisca que está a contacto directo con el banco de mineral de hierro oolítico. Esto facilita su identificación tanto en el terreno como en la minería y permite cartografiar con precisión el límite estratigráfico. El techo de la formación no se conoce, dado que la sedimentación del Concentracion se interrumpieron el plegamiento y levantamiento de la región, a lo que suman el cabalgamiento de la falla de Soapaga y la erosión.
- **EDAD Y ORIGEN:** el estudio del polen de algunas zonas de la formación (VAN DER HAMMEN T., 1957) permite fijar la edad del Concentracion entre el Eoceno Medio y el Oligoceno Medio. Está bien definido que la parte inferior de la formación es del Eoceno Medio- Superior, la parte media pertenece al Eoceno Superior-Oligoceno Inferior y la parte superior alcanza el Oligoceno Medio. En cuanto al origen, la facies varia de paludal a lagunar, con episodios de inundación salobre como la evidencia la existencia de yeso en la parte media del conjunto inferior. El banco de oolita ferrifera muestra superficies con “mud cracks” y fragmentos sideritizados de vegetales (ramitas, semillas, etc.) diseminados, lo que indica un ambiente paludal con desecaciones locales periódicas y escaso aporte detrítico de la cuenca.
- **CORRELACIÓN:** La formación Concentración es el equivalente de la formación Usme de la Sabana de Bogotá. En cuanto a la correlación con la región de Cúcuta, con base en el análisis palinológico, la formación Concentración corresponde a la parte superior de la formación Mirador y todo el conjunto que comprende las formaciones Carbonera y León Shales (VAN DER HAMMEN, 1957)⁴.

⁴ REYES CHITTARO ITALO, *Geología de la Región de Duitama- Sogamoso-Paz de Río (Departamento de Boyacá), Belencito, Abril de 1.984.*

Figura 4.columna estratigráfica formación Concetración



Fuente. Geología de la región Duitama-Sogamoso-Paz del Rio (Departamento de Boyacá) Reyes Italo.

4. TECNICAS DE ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

4.1 REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

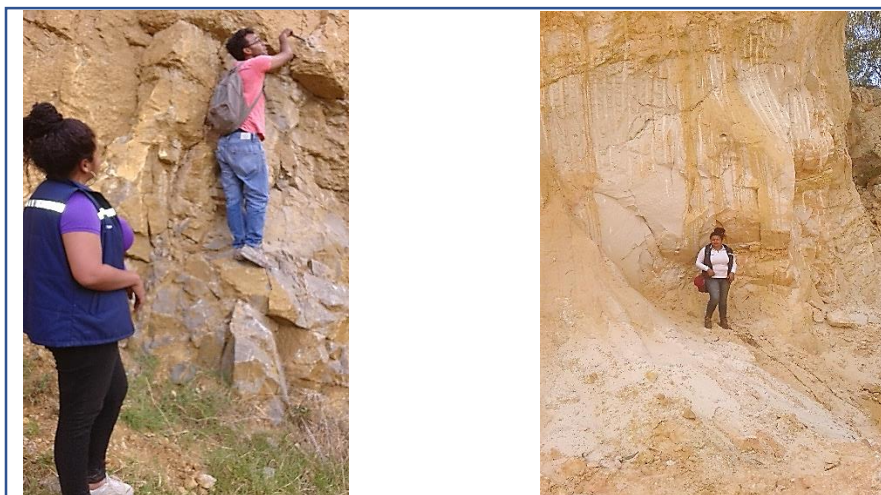
Se tuvo como una de las principales premisas el ubicarse conceptualmente de una manera muy amplia para el mejor desarrollo del trabajo con mayor propiedad en todo lo relacionado con los temas que abarca el proyecto. La consulta que se llevó a cabo buscando fuentes bibliográficas en la Biblioteca UPTC como también la consulta de artículos en línea de las 25 bases de datos de la universidad y proyectos de grado que contienen información pertinente.

4.2 TRABAJO EN EL ÁREA

El trabajo de campo comprende lo relacionado a:

- Consultar las principales características geológicas del área, que permita conocer fracturamiento, plegamientos y posibles debilitamientos de las rocas presentes en las zonas de estudio.
- Toma de muestras en campo para cada una de las formaciones que permitan realizar los diferentes análisis de propiedades dinámicas mecánicas de la matriz rocosa. Dichas muestras fueron tomadas en forma de bloques teniendo en cuenta el techo y el piso de la estratificación. Estos bloques se cubrieron por vinipel conservando así la humedad natural de la roca, Posteriormente se llevaron los bloques al laboratorio de suelos y rocas en donde se hizo la extracción de núcleo y finalmente se realizó el ensayo por el método de ultrasonido. (ver figura 8)

Imagen 4. Toma de muestras en campo



Fuente. Autora del proyecto

4.3 TRABAJO DE LABORATORIO

4.3.1 PREPARACION DE MUESTRAS

En esta etapa se realizó el tratamiento de los testigos de roca, obteniendo los datos necesarios para su posterior análisis.

Por cada formación geológica fueron ensayados 18 testigos de roca, así:

Tabla 1. Distribución de muestras

LITOLOGIA	ANISOTROPIA ESTRUCTURAL					
	PARALELA			PERPENDICULAR		
	NATURAL	SECO	SATURADO	NATURAL	SECO	SATURADO
CALIZAS	3	3	3	3	3	3
ARENISCAS	3	3	3	3	3	3
MINERAL HIERRO	3	3	3	3	3	3
TOTAL	9	9	9	9	9	9

Fuente. Autora del proyecto

Tres en cada estado; humedad natural, saturado, seco = 9 muestras

La extracción de núcleo se hizo en dos direcciones (paralelo y perpendicular) a la estratificación. (Ver imagen 5); y se realizaron en cada uno de los estados, es decir, 18 muestras por formación.

Imagen 5. Extracción de núcleos.



Fuente. Autora del proyecto

De los bloques recolectados en campo de los cuales se extrajeron dieciocho testigos con un taladro, teniendo en cuenta que la longitud de los testigos es en la mayoría de los casos el doble del diámetro. Teniendo en cuenta que son tres formaciones por dieciocho muestras, dando un total de cincuenta y cuatro testigos de roca.

Imagen 6. Muestras preparadas



Fuente. Autora del proyecto

- Seguido de la extracción y corte de testigos, se midió la longitud y diámetro de cada uno de estos, y luego se tomó el peso en estado natural. (ver imagen 7).

Imagen 7. Medición del peso de la muestra.



Fuente. Autora del proyecto

Se obtuvo como resultado las siguientes tablas:

Las muestras extraídas para la roca caliza en sentido paralelo a la estratificación tienen una densidad promedio de 2,6 g/cm³ y una desviación estándar de 0,04 (ver tabla 2).

Tabla 2. Medidas de calizas paralelas al estrato en estado natural

CALIZA PARALELA (CP) ESTADO NATURAL					
CÓDIGO	LONGITUD (cm)	PESO (g)	DIAMETRO (cm)	VOLUMEN (cm³)	DENSIDAD (g/cm³)
CPN01	10,0	511,5	4,98	194,78	2,62
CPN02	9,90	502,8	4,96	191,28	2,62
CPN03	9,90	504,1	4,96	191,28	2,63
CPSE04	9,98	507,2	4,97	193,61	2,61
CPSE05	10,2	505,1	5,0	200,76	2,51
CPSE06	10,5	541,9	5,0	206,16	2,62
CPSA07	10,3	528,3	4,96	199,01	2,65
CPSA08	10,0	503,2	4,96	193,22	2,60
CPSA09	10,1	518,9	4,98	196,72	2,63

Fuente. Datos de estudio

La densidad promedio de los especímenes extraídos para la roca caliza en sentido perpendicular a la estratificación es de 2,6 g/cm³, con una desviación estándar de 0,05 (ver tabla 3).

Tabla 3. Medidas de calizas perpendiculares al estrato en estado natural

CALIZA PERPENDIULAR (CPP) ESTADO NATURAL					
CÓDIGO	LONGITUD (cm)	PESO(g)	DIAMETRO (cm)	VOLUMEN (cm3)	DENSIDAD (g/cm3)
CPPN01	9,78	501,6	4,94	187,44	2,67
CPPN02	9,80	505,9	4,90	184,80	2,73
CPPN03	9,80	497,6	4,96	189,35	2,62
CPPSE04	9,80	510,3	4,96	189,35	2,69
CPPSE05	9,90	496,4	4,96	191,28	2,59
CPPSE06	9,82	501,7	4,86	182,16	2,75
CPPSA07	9,66	497,4	4,95	185,89	2,67
CPPSA08	9,70	491,8	4,94	185,91	2,64
CPPSA09	9,80	498,3	4,95	188,59	2,64

Fuente. Datos de estudio

Los núcleos que se obtuvieron de las areniscas paralelas a la estratificación tienen una densidad promedio de 1,89 g/cm³, y presentan una desviación estándar de 0,08 (ver tabla 4).

Tabla 4. Medidas de areniscas paralelas al estrato en estado natural

ARENISCA PARALELA (AP) ESTADO NATURAL					
CÓDIGO	LONGITUD (cm)	PESO (g)	DIAMETRO (cm)	VOLUMEN (cm3)	DENSIDAD (g/cm3)
AP01	9,80	351,8	4,80	177,33	1,98
AP02	9,80	360,5	4,9	184,80	1,95
AP03	9,90	361,8	4,9	186,68	1,93
AP04	9,92	363,5	4,94	190,13	1,91
AP05	10,3	351,4	5,0	202,24	1,73
AP06	10,1	360,7	5,0	198,31	1,81
AP07	9,98	350,8	4,94	191,28	1,83
AP08	9,9	351,9	4,86	183,65	1,91
AP09	9,66	344,1	4,8	174,80	1,96

Fuente. Datos de estudio

La densidad promedio de los testigos extraídos de las areniscas con orientación perpendicular a la estratificación es de 2,02 g/cm³, estos presentan una desviación estándar de 0,18 (ver tabla 5).

Tabla 5. Medidas de areniscas perpendiculares al estrato en estado natural

ARENISCA PERPENDICULAR (APP) ESTADO NATURAL					
CÓDIGO	LONGITUD (cm)	PESO (g)	DIAMETRO (cm)	VOLUMEN (cm3)	DENSIDAD (g/cm3)
APP01	10,3	488,1	4,98	200,62	2,43
APP02	10,5	412,1	4,96	202,88	2,03
APP03	9,8	361,9	4,9	184,80	1,95
APP04	9,7	364,1	4,8	175,52	2,07
APP05	10,6	406,1	5,0	208,13	1,95
APP06	9,92	359,9	4,74	175,04	2,05
APP07	9,6	358,3	4,83	175,89	2,03
APP08	9,7	350,4	4,81	176,25	1,98
APP09	9,84	323,8	4,9	185,55	1,74

Fuente. Datos de estudio

Los especímenes obtenidos del mineral de hierro en orientación paralela a la estratificación tienen una densidad promedio de 2,6 g/cm³, y una desviación estándar de 0,19 (ver tabla 6).

Tabla 6. Medidas de mineral de hierro paralela al estrato en estado natural.

MINERAL DE HIERRO PARALELA (AFP) ESTADO NATURAL					
CÓDIGO	LONGITUD (cm)	PESO (g)	DIAMETRO (cm)	VOLUMEN (cm3)	DENSIDAD (g/cm3)
AFP01	10	550,0	4,94	191,66	2,86
AFP02	10	532,6	4,96	193,22	2,75
AFP03	10,2	507,6	5,0	200,27	2,53
AFP04	10,2	446,6	5,0	200,27	2,22
AFP05	9,8	472,4	4,96	189,35	2,49
AFP06	10	521,7	5,0	196,34	2,65
AFP07	10,1	516,6	4,98	196,72	2,62
AFP08	10,2	528,8	4,90	192,34	2,74
AFP09	10	538,4	5,0	196,34	2,74

Fuente. Datos de estudio

Los testigos que se extrajeron del mineral de hierro en sentido paralelo a la estratificación tienen una densidad promedio de 2,6 g/cm³ y una desviación estándar de 0,2 (ver tabla 7).

Tabla 7. Medidas de mineral de hierro perpendicular al estrato en estado natural.

MINERAL DE HIERRO PERPENDIULAR (AFPP) ESTADO NATURAL					
CÓDIGO	LONGITUD (cm)	PESO (g)	DIAMETRO (cm)	VOLUMEN (cm ³)	DENSIDAD (g/cm ³)
AFPP01	10	561,0	4,96	193,22	2,90
AFPP02	10	558,5	4,98	194,78	2,86
AFPP03	10,3	507,6	5,0	202,24	2,50
AFPP04	10	446,0	5,01	197,13	2,26
AFPP05	10	476,2	5,01	197,13	2,41
AFPP06	10	529,6	4,96	193,22	2,74
AFPP07	10	503,9	4,96	193,22	2,60
AFPP08	10	514,7	4,97	194,00	2,65
AFPP09	10,4	536,5	4,96	200,94	2,66

Fuente. Datos de estudio

4.3.2 Condicionamiento de especímenes a diferentes condiciones de humedad

Se procede a dejar seis testigos de cada tipo de roca; tres en cada orientación (paralela y perpendicular) del estrato durante 24 horas en un horno a 80 °C y otros seis en proceso de saturación (ver imágenes 8 y 9).

Imagen 8. Muestras en el horno



Fuente. Autora del proyecto

Imagen 9. Muestras en saturación



Fuente. Autora del proyecto

De todos los testigos se seleccionaron seis muestras de cada litología, dicha selección se hizo con el fin de conservar el estado natural para realizar el ensayo de ultrasonido. (Ver tabla 8)

Tabla 8. Medida muestras en estado natural.

MUESTRAS EN ESTADO NATURAL					
TIPO DE ROCA	DIRECCIÓN DEL ESTRATO	CÓDIGO	LONGITUD (mm)	PESO (g)	DIÁMETRO (mm)
CALIZA	PARALELA	CPN01	100,0	511,0	49,8
CALIZA	PARALELA	CPN02	99,0	502,8	49,6
CALIZA	PARALELA	CPN03	99,0	504,1	49,6
CALIZA	PERPENDICULAR	CPPN01	97,8	501,6	49,4
CALIZA	PERPENDICULAR	CPPN02	98,0	505,9	49,0
CALIZA	PERPENDICULAR	CPPN03	98,0	497,6	49,6
ARENISCA	PARALELA	APN01	98,0	351,8	48,0
ARENISCA	PARALELA	APN02	98,0	360,5	49,0
ARENISCA	PARALELA	APN03	99,0	361,8	49,0
ARENISCA	PERPENDICULAR	APPN01	103,0	388,1	49,8
ARENISCA	PERPENDICULAR	APPN02	105,0	412,1	49,6
ARENISCA	PERPENDICULAR	APPN03	98,0	361,9	49,0
MINHIERRO	PARALELA	AFPN01	100,0	550,0	49,4
MINHIERRO	PARALELA	AFPN02	100,0	532,6	49,6
MINHIERRO	PARALELA	AFPN03	102,0	507,6	50,0
MINHIERRO	PERPENDICULAR	AFPPN01	100,0	561,0	49,6
MINHIERRO	PERPENDICULAR	AFPPN02	100,0	558,5	49,8
MINHIERRO	PERPENDICULAR	AFPPN03	103,0	507,6	50,0

Fuente. Datos de estudio

Después del proceso de secado en el horno se vuelve a medir la longitud y diámetro de cada muestra, y se toma nuevamente el peso de esta. (ver tabla 9).

Tabla 9. Medida de muestras en estado seco.

MUESTRAS EN ESTADO SECO					
TIPO DE ROCA	DIRECCIÓN DEL ESTRATO	CÓDIGO	LONGITUD (mm)	PESO (g)	DIÁMETRO (mm)
CALIZA	PARALELA	CPSE04	99,8	506,9	49,7
CALIZA	PARALELA	CPSE05	102	504,2	50,0
CALIZA	PARALELA	CPSE06	105	541,7	50,0
CALIZA	PERPENDICULAR	CPPSE04	98,0	510,1	49,6
CALIZA	PERPENDICULAR	CPPSE05	99,0	496,1	49,6
CALIZA	PERPENDICULAR	CPPSE06	98,2	501,5	48,6
ARENISCA	PARALELA	APSE04	99,2	362,8	49,4
ARENISCA	PARALELA	APSE05	103	350,7	50,0
ARENISCA	PARALELA	APSE06	101	360,1	50,0
ARENISCA	PERPENDICULAR	APPSE04	97,0	361,6	48,0
ARENISCA	PERPENDICULAR	APPSE05	106	403,0	50,0
ARENISCA	PERPENDICULAR	APPSE06	99,2	354,7	47,4

MINHIERRO	PARALELA	AFPSE04	102	445,4	50,0
MINHIERRO	PARALELA	AFPSE05	98,0	470,0	49,6
MINHIERRO	PARALELA	AFPSE06	100	520,0	50,0
MINHIERRO	PERPENDICULAR	AFPPSE04	100	442,4	50,1
MINHIERRO	PERPENDICULAR	AFPPSE05	100	473,0	50,1
MINHIERRO	PERPENDICULAR	AFPPSE06	100	526,0	49,6

Fuente. Datos de estudio

Para saturar las muestras se colocan los testigos en un recipiente al cual se le agrega cierta cantidad de agua, de tal forma que los núcleos queden totalmente sumergidos, después de transcurridas las 24 horas se extraen los testigos del recipiente y se procede a tomar las medidas de longitud, diámetro y peso. (ver tabla 10).

Tabla 10. Medida de muestras en estado saturado.

MUESTRAS EN ESTADO SATURADO					
TIPO DE ROCA	DIRECCIÓN DEL ESTRATO	CÓDIGO	LONGITUD (mm)	PESO(g)	DIÁMETRO (mm)
CALIZA	PARALELA	CPSA07	103	529,6	49,6
CALIZA	PARALELA	CPSA08	100	507,2	49,6
CALIZA	PARALELA	CPSA09	101	519,8	49,8
CALIZA	PERPENDICULAR	CPPSA07	96,6	499,4	49,5
CALIZA	PERPENDICULAR	CPPSA08	97,0	495,7	49,4
CALIZA	PERPENDICULAR	CPPSA09	98,0	501,9	49,5
ARENISCA	PARALELA	APSA07	99,8	381,1	49,4
ARENISCA	PARALELA	APSA08	99,0	382,0	48,6
ARENISCA	PARALELA	APSA09	96,6	375,0	48,0
ARENISCA	PERPENDICULAR	APPSA07	96,0	371,1	48,3
ARENISCA	PERPENDICULAR	APPSA08	97,0	360,8	48,1
ARENISCA	PERPENDICULAR	APPSA09	98,4	380,8	49,0
MINHIERRO	PARALELA	AFPSA07	101	518,6	49,8
MINHIERRO	PARALELA	AFPSA08	102	530,8	49,0
MINHIERRO	PARALELA	AFPSA09	100	540,4	50,0
MINHIERRO	PERPENDICULAR	AFPPSA07	100	522,4	49,6
MINHIERRO	PERPENDICULAR	AFPPSA08	100	539,3	49,7
MINHIERRO	PERPENDICULAR	AFPPSA09	104	549,7	49,6

Fuente. Datos de estudio

Después de realizar los procedimientos anteriores, se introducen los testigos de cada litología al horno a una temperatura de 105 °C durante 24 horas, esto para calcular la humedad gravimétrica.

4.3.3 Medición de velocidad de propagación de onda

Las velocidades de propagación de ondas ultrasónicas serán determinadas mediante el equipo GCTS Testing Systems CATS Ultrasónicas 1.83 equipo adquirido por la Escuela de Ingeniería de Minas de la UPTC, con el cual el grupo de investigación GEAM ha venido trabajando para ponerlo a punto y tener confiabilidad en las mediciones realizadas. El equipo de Ultrasonido consta de una unidad generadora de pulsos, capaz de emitir señales de ondas P y S, con frecuencias entre 500 Hz hasta 10 MHz, lo que lo hace adecuado para la realización de medidas en rocas. Adicionalmente el equipo cuenta con dos *Platens*, Uno transmisor del pulso y otro receptor del pulso; y de un sistema moderno de adquisición de datos y análisis de señales, con interface para conectar a un PC⁵. (Ver imagen 10).

Imagen 10. Equipo de ultrasonido

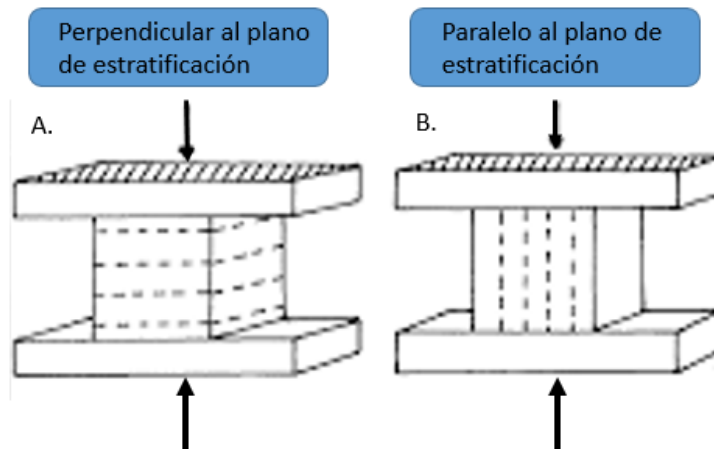


Fuente. Autora del proyecto

⁵ Morales A & Sierra G., *Estimación de la Resistencia y análisis de estabilidad de pilares en la mina de roca fosfórica "CAROLINA" mediante la aplicación de métodos no destructivos* (2011).

- Para determinar las propiedades dinámicas elásticas de la roca a bajos niveles de deformación se realizara a partir de su densidad, y de la velocidad de propagación de onda P y S a través del medio. (ver figura 5)

Figura 5. Definición de la orientación de medición de la velocidad de propagación de onda



Fuente. Autora del proyecto

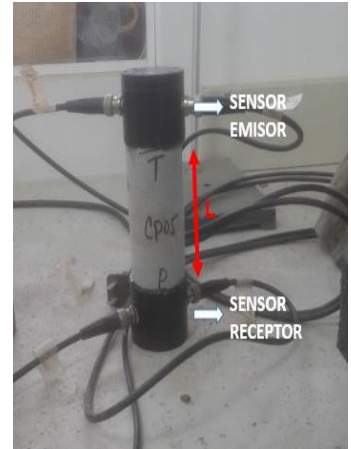
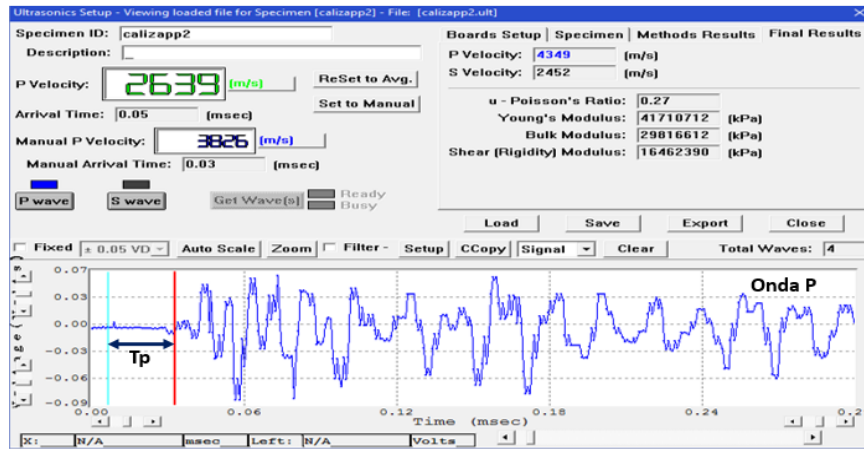
Imagen 11. Montaje de la muestra en el equipo de ultrasonido.



Fuente. Autora del proyecto

Se deben realizar las pruebas correspondientes a propiedades dinámicas y dinámicas a bajos niveles de deformación.

Figura 6. Visualización de parámetros de salida



El cálculo de la velocidad de onda se obtiene a partir de la interpretación del tiempo de viaje de la onda P o S a través del espécimen en una distancia L (ver figura 6), según lo indicado en la figura 13. El cálculo de la velocidad se realiza por medio de la siguiente expresión.

$$V_p = \frac{L}{T_p} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde,

L=longitud del núcleo

T_p = tiempo transcurrido

Para el cálculo de la velocidad de onda S se procede de forma similar que la anterior. La señal de onda S propagada a través del núcleo usando la siguiente expresión.

$$V_s = \frac{L}{T_s} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde,

L=longitud del núcleo

T_s = tiempo transcurrido

Para ejecutar este trabajo se utilizaran ensayos y conceptos como lo son propiedades dinámicas (V_s y V_p) y dinámicas a bajos niveles de deformación (Módulo de Young, Relación de Poisson, coeficiente de Lamé, módulo volumétrico, K, y el módulo de rigidez, G).

VELOCIDADES DE PROPAGACION DE ONDAS ULTRASONICAS Y PROPIEDADES DINAMICAS A BAJOS NIVELES DE DEFORMACIÓN. La propagación de ondas ultrasónicas en medios sólidos, como especímenes de roca, es una técnica reconocida por la asociación internacional de mecánica de rocas, con el fin de caracterizar este tipo

de materiales. De acuerdo a Torres (2005), el termino ultrasonido describe a las ondas mecánicas que se transmiten a través de gases, líquidos y sólidos, a frecuencias por encima del límite superior del oído humano, cerca de 16 KHz. Debido a que las características de estas ondas están relacionadas con las propiedades mecánicas de cualquier medio a través del cual ellas pasan, el ultrasonido es una alternativa importante para la caracterización de rocas⁶.

PARÁMETROS DE LAS ONDAS. El paso de una onda sísmica por un medio rocoso produce en cada punto de éste un movimiento que se conoce como vibración.

Pruebas correspondientes a propiedades dinámicas:

- **VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA LONGITUDINAL (VP):** Dentro de esta variedad de ondas, las P son las que se propagan con mayor velocidad (de ahí su nombre, primarias), presentando además la característica de poder propagarse por cualquier tipo de material, sea sólido o líquido.
- **VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDA TRANSVERSAL (VS):** Las ondas S viajan a una velocidad algo menor (secundarias) y no se propagan por masas líquidas. Por último, las ondas superficiales viajan con una velocidad menor aún.

Pruebas correspondientes a propiedades dinámicas a bajos niveles de deformación:

- **MODULO DE YOUNG (E):** o módulo de elasticidad longitudinal es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza⁷. Y es calculada en función de la velocidad de propagación de onda, con la siguiente ecuación⁸.

$$E = \frac{Vp^2 * \rho(1+v)(1-2v)}{(1-v)} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

Vp: Velocidad de propagación de la onda Longitudinal (m/s)

ρ : Densidad de la Roca en (Kg/m³)

v: Relación de Poisson

⁶ Ibid ²

⁷ Callister, Jr., William D (2005), *Fundamentals of Materials Science and Engineering* (2ª edición), United States of America

⁸ Gonzalez de Vallejo, L., Ferrer M., Ortuño L & Oteo C. *Ingeniería Geológica* (2004).

- **RELACIÓN DE POISSON (ν):** es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento⁹. Y es calculada en función de la velocidad de propagación de onda, con la siguiente ecuación¹⁰.

$$\nu = \frac{1 - 2\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}{2 - 2\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

Vp: Velocidad de propagación de la onda Longitudinal (m/s)

Vs: Velocidad de propagación de la onda transversal (m/s)

- **MÓDULO VOLUMÉTRICO K** de un material mide su resistencia a la compresión uniforme y, por tanto, indica el aumento de presión requerido para causar una disminución unitaria de volumen dado¹¹. Y es calculada en función de la velocidad de propagación de onda, con la siguiente ecuación¹².

$$K = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right) \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde:

ρ : Densidad de la Roca en (Kg/m³)

Vp: Velocidad de propagación de la onda Longitudinal (m/s)

Vs: Velocidad de propagación de la onda transversal (m/s)

- **MÓDULO DE RIGIDEZ (G):** El módulo de elasticidad transversal, es una constante elástica que caracteriza el cambio de forma que experimenta un material elástico (lineal e isótropo) cuando se aplican esfuerzos cortantes. Este módulo recibe una gran variedad de nombres, entre los que cabe destacar los siguientes: módulo de rigidez transversal, módulo de corte, módulo de cortadura, módulo elástico tangencial, módulo de elasticidad transversal, y segunda constante de Lamé¹³. Y es calculada en función de la velocidad de propagación de onda, con la siguiente ecuación¹⁴.

⁹ Ortiz Berrocal, L., *Elasticidad*, McGraw-Hill, 1998

¹⁰ *Ibid* ⁵

¹¹ *Bulk Elastic Properties en hyperphysics* de la universidad de Georgia

¹² *Ibid* ⁵

¹³ W.A. Wooster, *Tensors and group theory for the physical properties of crystals*, Clarendon Press, Oxford, 1973.

¹⁴ *Ibid* ⁵

$$G = Vs^2\rho \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde:

ρ : Densidad de la Roca en (Kg/m³)

Vs: Velocidad de propagación de la onda transversal (m/s)

Los parámetros básicos de análisis son:

Amplitud (A): desplazamiento máximo de un punto desde su posición de reposo.

Velocidad de partículas (v): velocidad a la que se desplaza el punto.

Aceleración (a): ritmo de cambio de la velocidad.

Frecuencia (f): número completo de oscilaciones o ciclos por segundo. La frecuencia es el inverso del período Ts.

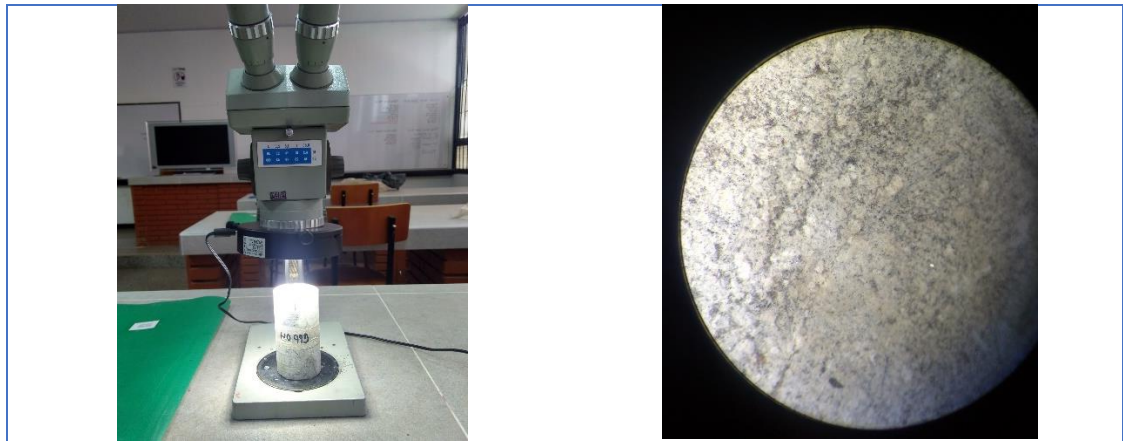
5. DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA MACROSCOPICA DE CADA LITOLOGIA DE ESTUDIO.

Teniendo en cuenta que la roca, por su misma naturaleza, es un material heterogéneo en que sus propiedades y características varían de un lugar a otro aun proviniendo todos de la misma muestra, formación geológica o tren de perforación. Al estudiar cualquier propiedad o característica de las rocas, interesa no solo el valor promedio de dicha característica, sino también la variación que puede esperarse que ocurra. Este capítulo muestra cada uno de los tipos de rocas de la investigación descritos petrográficamente macroscópicamente.

5.1 CALIZA

Biomicrita compacta, de Color gris medio (5N5 en la escala de Munsell). En algunos sectores están enriquecidos en óxidos de hierro color naranja grisáceo 10YR 7/4 con una insipiente presencia de fósiles de tamaño menor a 5 mm. Presenta una estructura masiva y su vez una fuerte reacción al ácido clorhídrico (Ver imagen 12).

Imagen 12. Vistas estereográfica de roca caliza

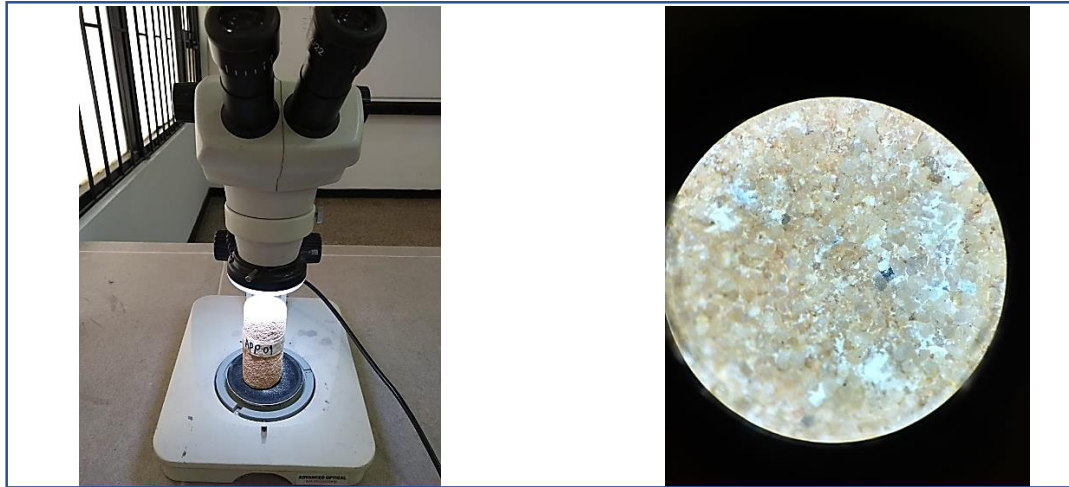


Fuente. Autora del proyecto

5.2 ARENISCA

Cuarzoarenita de grano medio, color amarillo grisáceo (5Y 8/7 en la escala de Munsell), friable bien seleccionada de granos subesfericos- subangulares con empaquetamiento longitudinal. Armazón compuesto >45% cuarzo, y hasta 2% de turmalina y matriz arcillosa <2%.(ver imagen13).

Imagen 13. Vistas estereográfica de areniscas.

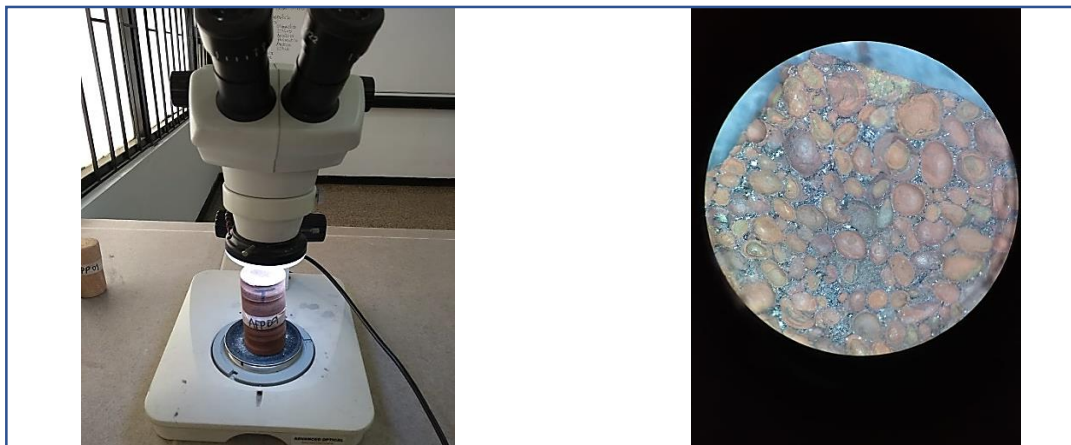


Fuente. Autora del proyecto

5.3 MINERAL HIERRO

Roca ferruginosa oolítica, color café oscuro rojizo (10R 3/4 en la escala de Munsell), bien seleccionada. Armazón compuesto 75% de Oolitos tamaño arena gruesa, compuesto frecuentemente por hematita y limonita, rara vez con núcleo de chamosita (no se identifican núcleos detríticos); el cemento de tipo relleno con 25% es de composición probable carbonítica; Siderita.(ver imagen 14).

Imagen 14. Vistas estereográfica de mineral de hierro.



Fuente. Autora del proyecto

6. ENSAYO DE ULTRASONIDO

Un generador de onda produce vibraciones que se transmiten a través de los materiales como ondas sónicas cuyo frente se traslada radialmente a partir del punto de origen, obteniendo dos tipos de ondas internas: primarias o de compresión (P), estas ondas se propagan en el interior de los materiales produciendo de manera alternativa compresiones y distensiones y dando lugar a un movimiento de partículas en la dirección de propagación de las ondas; son las más rápidas y ocasionan en el material en el cual se propagan cambio de volumen y no de forma. El segundo tipo está constituido por ondas transversales o de corte (S), que dan lugar a movimientos en las partículas perpendicularmente a la dirección de propagación de dichas ondas. A raíz de estas los materiales sufren cambios de forma y no de volumen.

6.1 INTERPRETACIÓN DE SEÑALES PARA EL CALCULO DE VELOCIDAD DE ONDA

Cada vez que se genera una perturbación en una masa de rocas, se crean cuatro tipos principales de onda, partiendo desde el punto de generación, viajan a través de la masa. Estas ondas son de compresión, de distorsión o cizalla y superficiales. De la teoría de la elasticidad, se sabe que las velocidades de estas ondas están relacionadas con el módulo de deformabilidad (E), con el módulo de rigidez (G) y con el coeficiente de Poisson (ν)¹⁵.

A continuación se muestran las señales obtenidas producto del ensayo de ultrasonido realizado con el equipo GCTS Testing Systems CATS Ultrasónicas 1.83 a las tres litologías de interés (caliza, arenisca y mineral de hierro) en los estados natural, seco y saturado, en orientación paralela y perpendicular al estrato. El equipo GCTS arroja los resultados de parámetros dinámicos (V_p , V_s) y parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación (Módulo de Young, Relación de Poisson, coeficiente de Lamé, módulo volumétrico, K, y el módulo de rigidez, G), facilitando así el desarrollo y la interpretación de la caracterización de roca con el método de ultrasonido.

6.1.1 Estado natural de las rocas

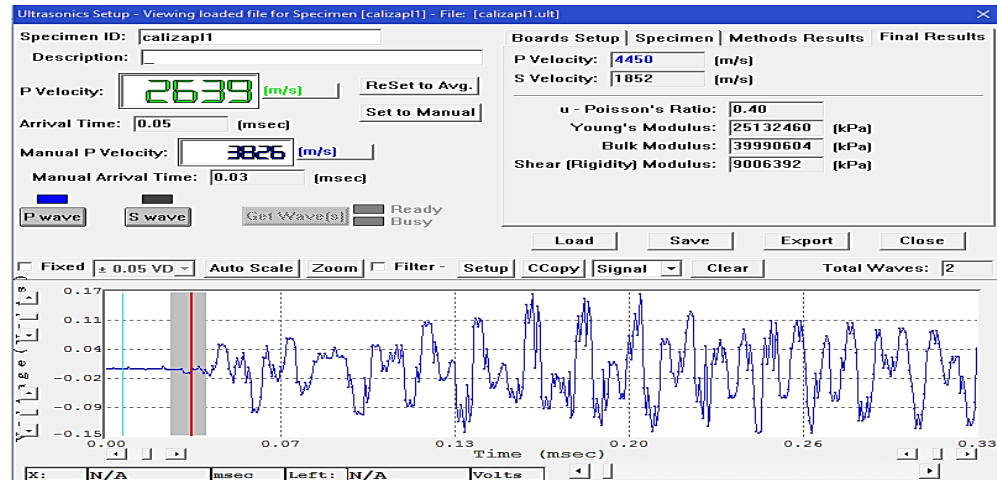
Se realizaron ensayos de ultrasonidos en estado natural, a tres testigos en roca por cada dirección de orientación, para cada litología. En las figuras 7 y 8 se muestra el resultado del ensayo hecho a un núcleo en dirección paralela y otro perpendicular

¹⁵ Correa Arroyave, A., *Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio*. (Segunda edición, 2013)

a la estratificación de la roca caliza. Los resultados se pueden observar completamente en el anexo A.

CALIZAS PARALELAS (CPN) CPN01

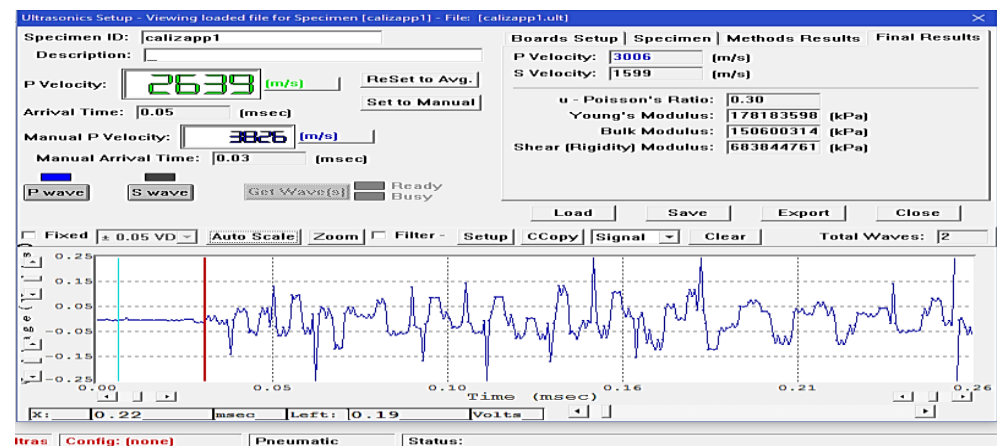
Figura 7. Resultado de ensayo de ultrasonido para roca caliza en estado natural paralelo al estrato.



Fuente. Datos de estudio

CALIZAS PERPENDICULARES (CPPN) CPPN01

Figura 8. Resultado de ensayo de ultrasonido para roca caliza en estado natural perpendicular al estrato.



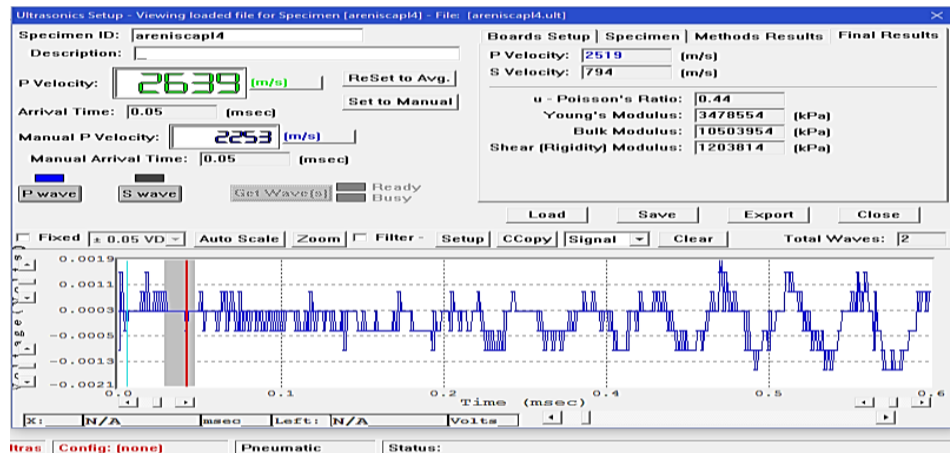
Fuente. Datos de estudio

6.1.2 Estado seco

Para que el análisis del proyecto sea completo es necesario realizar el ensayo de ultrasonido a los testigos modificando las condiciones naturales. En este caso se muestran el resultado del ensayo hecho a un núcleo en dirección paralela y perpendicular a la estratificación de las areniscas luego del proceso de secado en el horno durante 24 horas tal como se detalló anteriormente (figura 9 y 10). Los resultados se pueden observar completamente en el anexo B.

ARENISCA PARALELA (APSE) APSE04

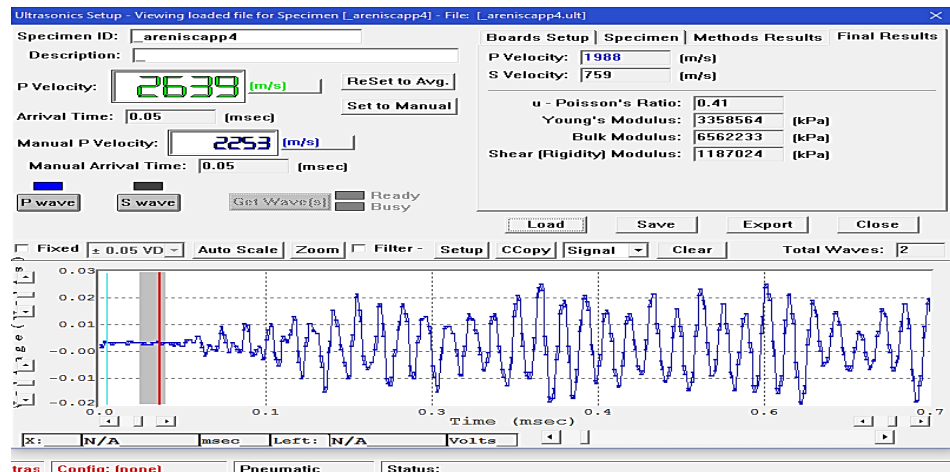
Figura 9. Resultado de ensayo de ultrasonido para arenisca en estado seco paralelo al estrato.



Fuente. Datos de estudio

ARENISCA PERPENDICULAR (APPSE) APPSE04

Figura 10. Resultado de ensayo de ultrasonido para arenisca en estado seco perpendicular al estrato.



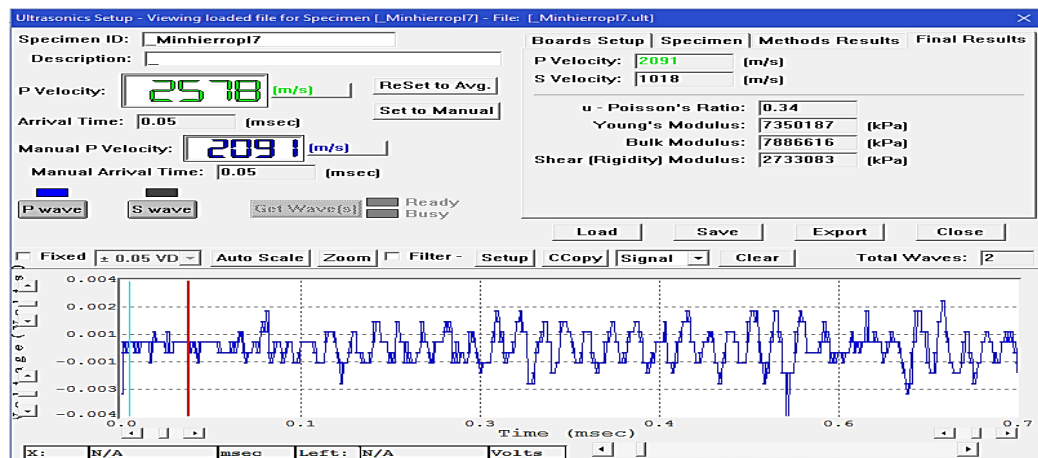
Fuente. Datos de estudio

6.1.3 Estado saturado

Es indispensable efectuar también el ensayo de ultrasonido en las muestras saturadas de todos los testigos seleccionados para esta fase. Especialmente se muestran a continuación, el producto de dicho ensayo en los núcleos de mineral de hierro de la formación concentración tanto paralelo como perpendicular a la estratificación (figura 11 y 12). Los resultados se pueden observar completamente en el anexo C.

MINERAL DE HIERRO PARALELA (AFPSA) AFPSA07

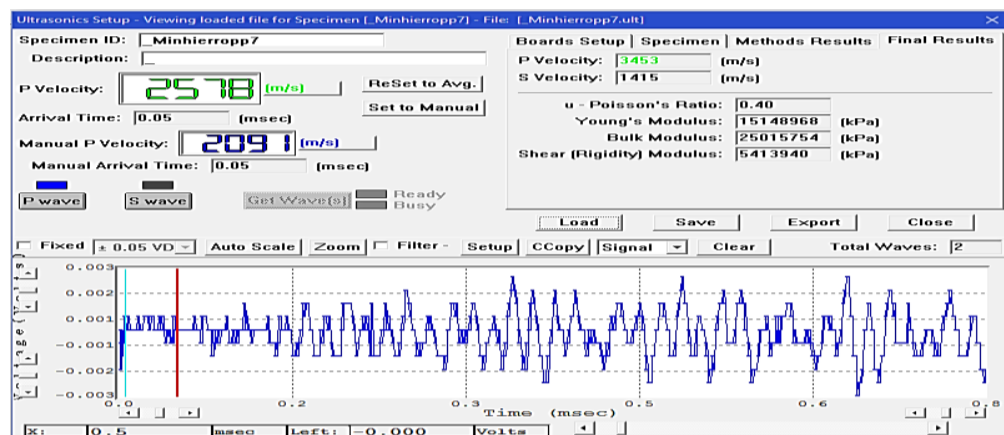
Figura 11. Resultado de ensayo de ultrasonido para mineral de hierro en estado saturado paralelo al estrato.



Fuente. Datos de estudio

MINERAL DE HIERRO PERPENDICULAR (AFPPSA) AFPPSA07

Figura 12. Resultado de ensayo de ultrasonido para mineral de hierro en estado saturado perpendicular al estrato.



Fuente. Datos de estudio

Después de haber realizado el ensayo de ultrasonido a cada una de las muestras en cada uno de los estados descritos anteriormente se tabulan los resultados de propiedades dinámicas (V_p y V_s) y dinámicas a bajos niveles de deformación (Módulo de Young, Relación de Poisson, módulo volumétrico, K , y el módulo de rigidez, G).

6.2 VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN DE ONDA PARA CADA LITOLIGIA DE ESTUDIO

Las ondas ultrasónicas pueden propagarse en cualquier medio donde haya fracciones de materia, átomos y moléculas capaces de vibrar. Estas ondas son absorbidas por todos los materiales, a causa de la transformación de su energía en calor, por lo cual no todo los materiales son aptos para la propagación de estas ondas.

6.2.1 Efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda y Anisotropía

Según lo indicado anteriormente las muestras fueron condicionadas para diferentes condiciones de humedad con el ánimo de evaluar el efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda. La humedad fue determinada para cada uno de los tres especímenes en cada uno de los estados de la siguiente manera:

1. Se toma la muestra y se condiciona
2. Se toma el peso antes de hacer el ensayo
3. Se seca la muestra y se calcula la humedad de la siguiente manera

$$W = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde:

W_w : peso de agua

W_s : Peso de solido

4. Se reportan los resultados de las velocidades de propagación de onda para diferentes condiciones de humedad en el momento de realizar el ensayo.

La **anisotropía** Saroglou & Tsiambaos (2007) proponen una clasificación en función a la velocidad de propagación de ondas P (ondas longitudinales)¹⁶según la ecuación 8.

¹⁶ Saroglou & Tsiambaos, Saroglou, H.; Tsiambaos, G., 2007. Classification of anisotropic rocks. 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics. In: Ribeiro e Sousa, Otalla, Grossmann, editors. Taylor & Francis Group, London, pp. 191-196.

$$I_{Vp} = \frac{Vp(0^\circ)}{Vp(90^\circ)} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

$Vp(0^\circ)$ es la máxima velocidad de propagación de la onda P paralela a los planos de simetría y $Vp(90^\circ)$ es mínima velocidad de propagación de la onda perpendicular a los planos de simetría. La tabla 11 muestra esta clasificación.

Tabla 11. Clasificación del grado de anisotropía de las rocas (Saroglou & Tsiambaos, 2006).

GRUPO DE CLASIFICACIÓN	I_{Vp}
Pobrememente anisotrópica	$\leq 1,5$
Moderadamente anisotrópica	$\leq 2,0$
Altamente anisotrópica	$> 2,0$

Fuente. Saroglou & Tsiambaos (2007)

Para realizar el cálculo de **anisotropía** se utiliza la velocidad de onda **P**, debido a que en el método de ultrasonido se destaca el contraste entre la facilidad para determinar la velocidad de ondas primarias o de compresión (Vp) en relación con la dificultad para evaluar la velocidad de ondas secundarias o de corte (Vs)¹⁷.

6.2.1.1 Efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda en la roca caliza

En la tabla 11 y 12 Se muestran los resultados obtenidos de las velocidades de propagación de onda realizados en los testigos de caliza teniendo en cuenta sus tres estados de humedad en las dos orientaciones.

Tabla 12. Efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda para las calizas P.

CALIZAS PARALELAS			
CODIGO	HUMEDAD DEL ENSAYO (%)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
CPN01	0,12	4450	1852
CPN02	0,06	4816	2165
CPN03	0,06	4605	1889
CPSE04	0,04	3847	1234

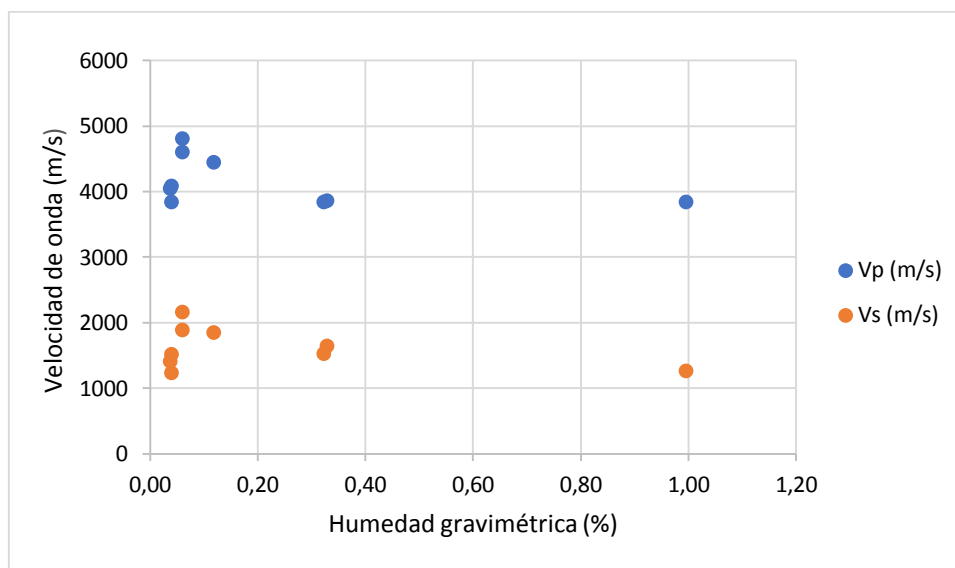
¹⁷ Aponte, A., *Evaluación de Métodos No Convencionales de Caracterización Geotécnica*, Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Bogotá D.C, 2011.

CPSE05	0,0397	4088	1522
CPSE06	0,037	4046	1415
CPSA07	0,322	3844	1534
CPSA08	0,996	3841	1265
CPSA09	0,33	3865	1648

Fuente. Datos de estudio

En el grafico 1 se observa una disminución de la velocidad propagación de onda P de 25%, producto del aumento de la humedad, mientras que para la velocidad de onda S tiene una reducción de 75% debido al decrecimiento de la humedad. La relación entre la velocidad de onda P y onda S equivale a 2,35 para el estado natural, 2,87 para el estado seco y 2,6 para el estado saturado indicando que la onda P viaja mucho más rápido que la onda S.

Grafico 1. Velocidades de propagación de onda vs humedad gravimétrica para la calizas P.



Fuente. Datos de estudio

Tabla 13. efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda para las calizas PP.

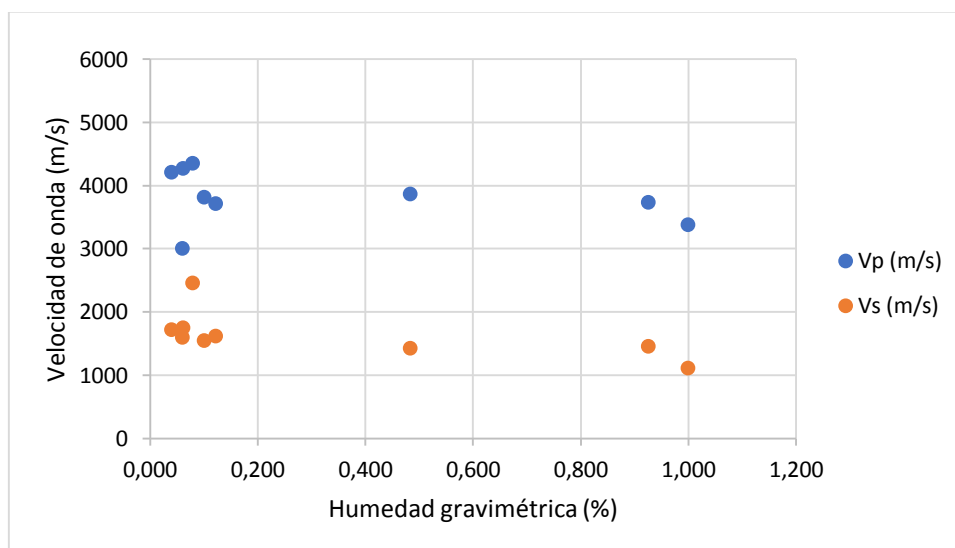
CALIZAS PERPENDICULARES			
CODIGO	HUMEDAD DEL ENSAYO (%)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
CPPN01	0,06	3006	1599
CPPN02	0,08	4349	2452
CPPN03	0,06	4271	1752

CPPSE04	0,039	4205	1715
CPPSE05	0,121	3708	1617
CPPSE06	0,10	3814	1550
CPPSA07	0,483	3864	1424
CPPSA08	0,998	3377	1111
CPPSA09	0,92	3737	1454

Fuente. Datos de estudio

En el grafico 2 se observa una disminución de la velocidad de propagación de onda P de 44%, manteniéndose estable la humedad, mientras que para la velocidad de la onda S tiene una reducción de 120% debido a la disminución de la humedad. La relación entre la velocidad de onda P y onda S equivale a 2 para el estado natural, 2,4 para el estado seco y 2,75 para el estado saturado indicando que la onda P viaja mucho más rápido que la onda S.

Grafico 2. Velocidad de propagación de onda vs humedad gravimétrica para la calizas PP.



Fuente. Datos de estudio

6.2.1.2 Anisotropía para la caliza

Para evaluar el grado de anisotropía de la roca caliza según la ecuación 8, se relacionan las velocidades promedio de propagación de onda Vp que fueron tomadas de forma paralela y perpendicular a la estratificación, en cada estado (ver tabla 14) así:

Tabla 14. Evaluación de Anisotropía en cada estado para la caliza

CALIZA								
ESTADO	HUMEDAD	PROMEDIO Vp (m/s)	PROMEDIO Vs (m/s)	ESTADO	HUMEDAD	PROMEDIO Vp (m/s)	PROMEDIO Vs (m/s)	ANISOTROPIA
CPN	0,08	4623,67	1968,67	CPPN	0,07	3875,33	1934,33	1,19
CPSE	0,04	3993,67	1390,33	CPPSE	0,09	3909,00	1627,33	1,02
CPSA	0,55	3850,00	1482,33	CPPSA	0,80	3659,33	1329,67	1,05

Fuente. Datos de Estudio

Según los resultados enunciados en la tabla 14, la caliza de estudio es una roca **pobrementemente anisotrópica**, debido a que presenta valores de 1,19, 1,02 y 1,05 respectivamente, los cuales son menor a 1,5 como se indica en la tabla 11.

6.2.2 Efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda en la arenisca.

Se muestran los resultados obtenidos de las velocidades de propagación de onda realizados en los núcleos de areniscas teniendo en cuenta sus tres estados de humedad en las dos orientaciones (Ver tablas 15 y 16).

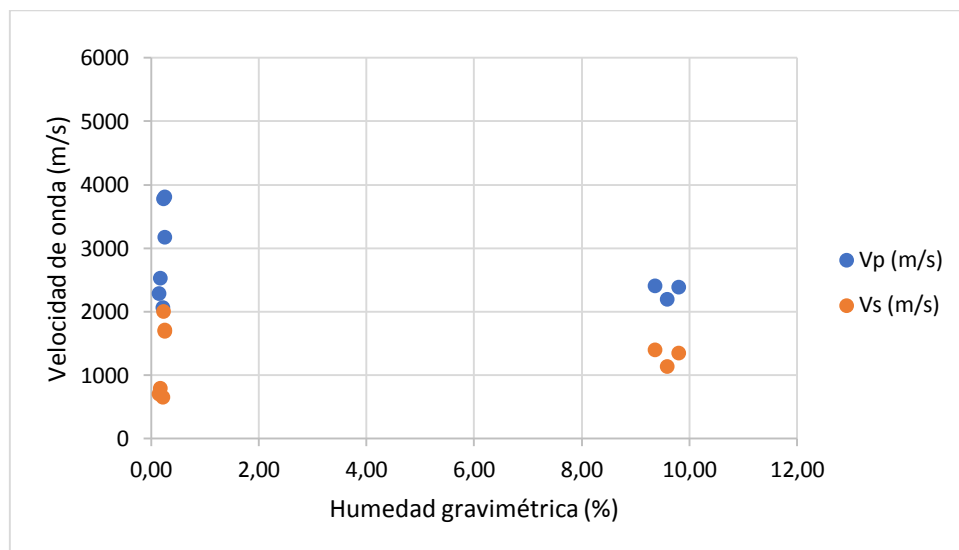
Tabla 15. efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda para las areniscas P.

ARENISCAS PARALELAS			
CODIGO	HUMEDAD DEL ENSAYO (%)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
APN01	0,23	3770	2004
APN02	0,25	3167	1685
APN03	0,249	3809	1703
APSE04	0,17	2519	794
APSE05	0,14	2278	702
APSE06	0,22	2062	648
APSA07	9,35	2407	1399
APSA08	9,80	2387	1346
APSA09	9,59	2188	1128

Fuente. Datos de estudio

Para el análisis de la velocidad de onda con respecto a la humedad de las areniscas paralelas (ver gráfico 3) se observa una reducción de la velocidad de propagación de onda P de 46%, debido al leve incremento de la humedad, mientras que para la velocidad de la onda S tiene una reducción de 68% debido al aumento de la humedad. La relación entre la velocidad de onda P y onda S equivale a 1,99 para el estado natural, 3,2 para el estado seco y 1,8 para el estado saturado, indicando que la onda P viaja mucho más rápido que la onda S.

Grafico 3. Velocidad de propagación de onda vs humedad gravimétrica para las areniscas P.



Fuente. Datos de estudio

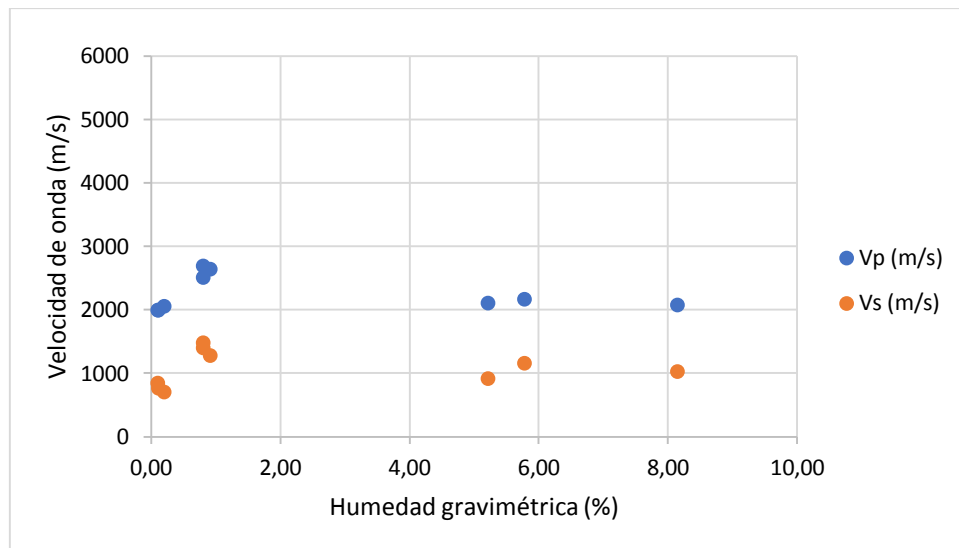
Tabla 16. Efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda para las areniscas PP.

ARENISCAS PERPENDICULAR			
CODIGO	HUMEDAD DEL ENSAYO (%)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
APPN01	0,91	2639	1275
APPN02	0,81	2690	1480
APPN03	0,81	2511	1394
APPSE04	0,111	1988	759
APPSE05	0,10	1989	845
APPSE06	0,2	2052	705
APPSA07	5,22	2104	911
APPSA08	5,78	2161	1151
APPSA09	8,15	2069	1028

Fuente. Datos de estudio

En el grafico 4 se observa una disminución de la velocidad de propagación de onda P de 34%, debido al considerado aumento de la humedad, mientras que para la velocidad de la onda S tiene una reducción de 109% debido al crecimiento de la humedad. En cada uno de los estados onda P y onda S tiene una reducción equivalente a 1,89 para el estado natural, 2,61 para el estado seco y 2,05 para el estado saturado, lo que significa que la onda P viaja mucho más rápido que la onda S.

Grafico 4. Velocidad de propagación de onda vs humedad gravimétrica para las areniscas PP.



Fuente. Datos de estudio

6.2.2.1 Anisotropía para la arenisca

En la tabla 17, se relacionan las velocidades promedio de propagación de onda Vp que fueron tomadas de forma paralela y perpendicular a la estratificación, en cada estado, con el fin de evaluar el grado de anisotropía de la arenisca, así como se muestra en la ecuación 8.

Tabla 17. Evaluación de Anisotropía en cada estado para la arenisca

ARENISCA								
ESTADO	HUMEDAD	PROMEDIO Vp (m/s)	PROMEDIO Vs (m/s)	ESTADO	HUMEDAD	PROMEDIO Vp (m/s)	PROMEDIO Vs (m/s)	ANISOTROPIA
APN	0,24	3582,00	1797,33	APPN	0,84	2613,33	1383,00	1,37
APSE	0,18	2286,33	714,67	APSE	0,14	2009,67	769,67	1,14
APSA	9,58	2327,33	1291,00	APPSA	6,38	2111,33	1030,00	1,10

Fuente. Datos de Estudio

La areniscas se clasifican según la tabla 11 como **pobremente anisotrópica**, debido a que los valores de anisotropía para cada uno de los estados son menores a 1,5, como se presenta en la tabla 17.

6.2.3 Efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda en el mineral de hierro.

Los resultados obtenidos de las velocidades de propagación de onda realizados en los testigos de mineral de hierro teniendo en cuenta sus tres estados de humedad en las dos orientaciones se muestran en tablas 18 y 19.

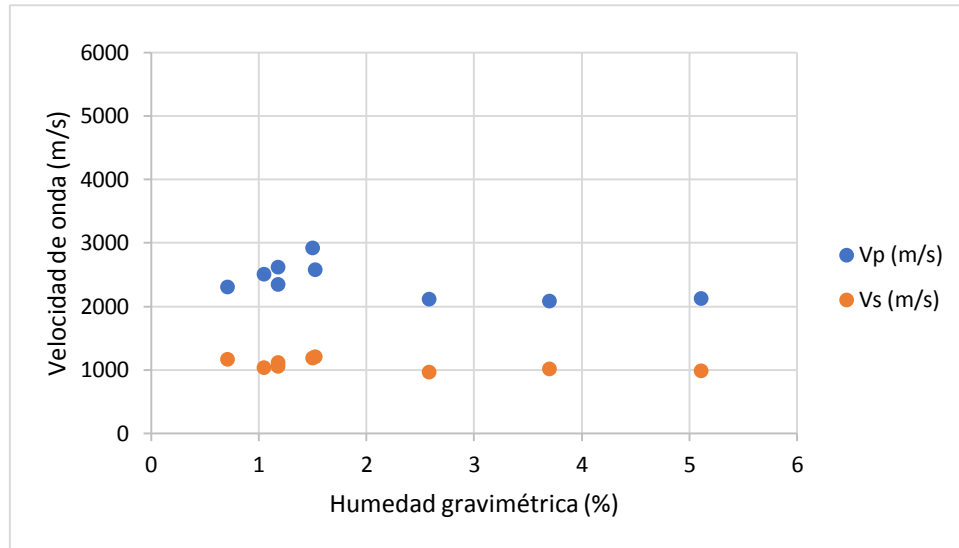
Tabla 18. Efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda para el mineral de hierro P.

MINERAL DE HIERRO PARALELO			
CODIGO	HUMEDAD DEL ENSAYO (%)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
AFPN01	1	2512	1035
AFPN02	1,18	2621	1053
AFPN03	1,5	2922	1185
AFPSE04	1,18	2351	1119
AFPSE05	0,71	2304	1171
AFPSE06	1,52	2578	1209
AFPSA07	3,7	2091	1018
AFPSA08	5,11	2129	990
AFPSA09	2,58	2112	970

Fuente. Datos de estudio

En el siguiente grafico se observa una disminución de la velocidad de propagación de onda P de 28%, debido al gran aumento de la humedad, la velocidad de la onda S tiene una reducción del 20% debido a la disminución de la humedad. En cada uno de los estados la onda P y la onda S tienen una reducción igual a 2,46 para el estado natural, 2,06 para el estado seco y 2,12 para el estado saturado, lo que significa que la onda P viaja mucho más rápido que la onda S. (ver gráfico 5)

Grafico 5. Velocidad de propagación de onda vs humedad gravimétrica para el mineral de hierro P.



Fuente. Datos de estudio

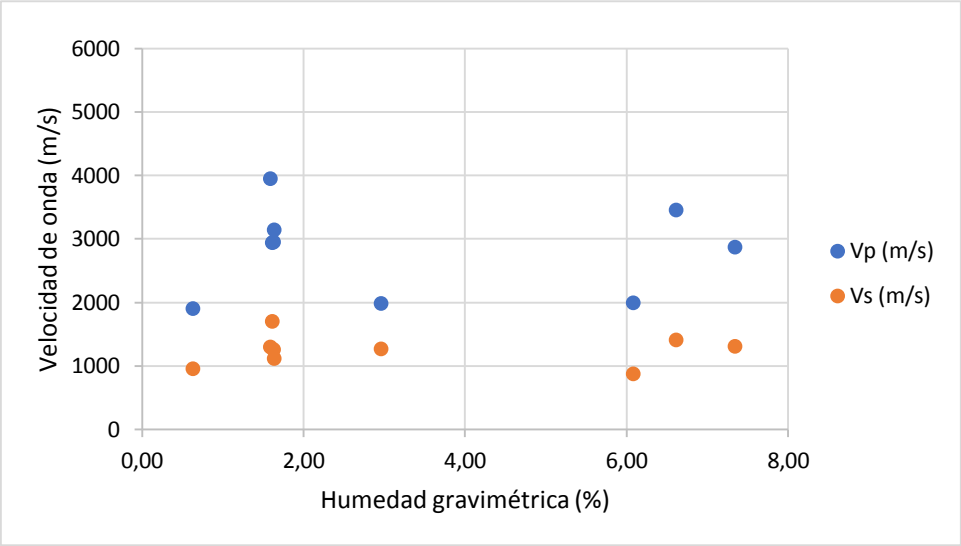
Tabla 19. Efecto de la humedad en la velocidad de propagación de onda para mineral de hierro PP.

MINERAL DE HIERRO PERPENDICULAR			
CODIGO	HUMEDAD DEL ENSAYO (%)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
AFPPN01	1,61	2944	1705
AFPPN02	0,63	1903	958
AFPPN03	2,96	1985	1272
AFPPSE04	1,63	3146	1116
AFPPSE05	1,59	3955	1300
AFPPSE06	1,62	2949	1257
AFPPSA07	6,61	3453	1415
AFPPSA08	7,34	2869	1313
AFPPSA09	6,08	1998	872

Fuente. Datos de estudio

En cada uno de los estados la onda P y la onda S tienen una reducción igual a 1,7 para el estado natural, 2,7 para el estado seco y 2,3 para el estado saturado, lo que significa que la onda P viaja mucho más rápido que la onda S. también se puede observar una disminución de la velocidad de propagación de onda P de 51%, debido a la notable disminución de la humedad, la velocidad de la onda S tiene una reducción del 48% debido al considerable incremento de la humedad.

Grafico 6. Velocidad de propagación de onda vs humedad gravimétrica para el mineral de hierro PP.



Fuente. Datos de estudio

6.2.3.1 Anisotropía para el mineral de hierro

Las velocidades promedio de propagación de onda Vp se tomaron en orientación paralela y perpendicular a la estratificación, en cada estado, con el fin de evaluar el grado de anisotropía del mineral de hierro, dichos resultados se observan en la tabla 20. Lo anterior basados en la ecuación 8.

Tabla 20. Evaluación de Anisotropía en cada estado para la arenisca

MINERAL DE HIERRO								
ESTADO	HUMEDAD	PROMEDIO Vp (m/s)	PROMEDIO Vs (m/s)	ESTADO	HUMEDAD	PROMEDIO Vp (m/s)	PROMEDIO Vs (m/s)	ANISOTR OPIA
AFPN	1,24	2685,00	1091,00	AFPPN	1,73	2277,33	1311,67	1,18
AFPSE	1,14	2411,00	1166,33	AFPSE	1,61	3350,00	1224,33	0,72
AFPSA	3,80	2110,67	992,67	AFPPSA	6,68	2773,33	1200,00	0,76

Fuente. Datos de Estudio

Según la tabla 11 el mineral de hierro se clasifica como **pobrementemente anisotrópica**, debido a que los valores de anisotropía para cada uno de los estados son menores a 1,5, como se presenta en la tabla 20.

6.3 EFECTOS DE LA HUMEDAD EN PARÁMETROS DINÁMICOS A BAJOS NIVELES DE DEFORMACIÓN.

Para la evaluación y análisis de cada parámetro se hizo un promedio en cada uno de los estados de humedad de las rocas de estudio.

6.3.1 Efectos de la humedad en parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para la roca caliza.

En las tablas 21 y 22 se observan cada uno de los parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación, y se analizan calculando la relación entre cada uno de estos, es decir, en sentido paralelo y perpendicular.

Tabla 21. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para la caliza P.

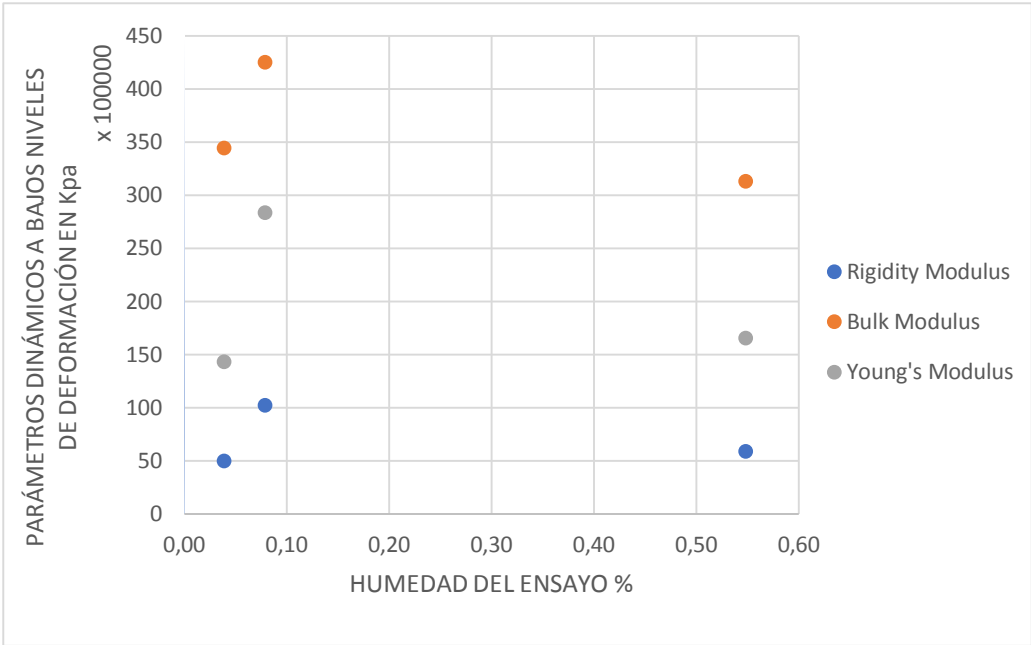
CALIZAS PARALELAS					
TIPO DE ROCA Y ESTADO	PROMEDIO U-POISSON'S RATIO	PROMEDIO YOUNG'S MODULUS (Kpa)	PROMEDIO BULK MODULUS (KPa)	PROMEDIO RIGIDITY MODULUS (KPa)	PROMEDIO HUMEDAD DEL ENSAYO (%)
CPN	0,39	28353272	42505116	10217052	0,08
CPSE	0,43	14324310	34439424	5010748	0,04
CPSA	0,41	16539763	31330366	5878936	0,55

Fuente. Datos de estudio

Al analizar los parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación, se encontró una relación de 1,21 en estado natural, 1,10 en estado seco y 0,98 en estado saturado reflejando que la Relación de Poisson es mayor en el estado natural de estas rocas en sentido paralelo, que en cualquiera de los otros estados. Con el Modulus de Young's que es la relación entre el esfuerzo y la deformación es de 1,08 lo que quiere decir que no hay una variación significativa; Del Modulus de Rigidity se observa que la variación entre las dos orientaciones de perforación es de 1,21 lo que significa que tiene mayor deformación las que son extraídas en sentido paralelo que la que están extraídas en sentido perpendicular y del Modulus de Bulk que mide la resistencia del material, se observó una relación de 1,22, es decir, que dicha resistencia aumenta en el sentido paralelo a la estratificación.

En el siguiente grafico se observa una relación de reducción promedio para las calizas en orientación paralelas a la estratificación de 0,97 para Young's Modulus, 0,35 Bulk Modulus y 1,04 en el Rigidity Modulos. (Ver gráfico 7).

Grafico 7. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación vs Humedad para la caliza P.



Fuente. Datos de estudio

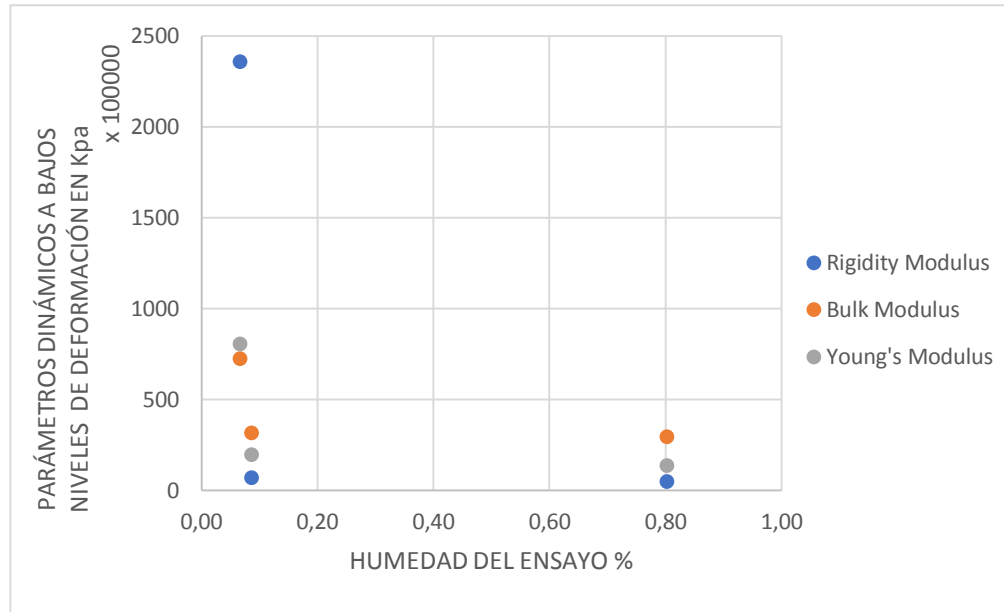
Tabla 22. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para la caliza PP.

CALIZAS PERPENDICULARES					
CODIGO	PROMEDIO U- POISSON'S RATIO	PROMEDIO YOUNG'S MODULUS (Kpa)	PROMEDIO BULK MODULUS (KPa)	PROMEDIO RIGIDITY MODULUS (KPa)	PROMEDIO HUMEDAD DEL ENSAYO (%)
CPPN	0,32	80819939	72529426	236124349	0,07
CPPSE	0,39	19824127	31642933	7105958	0,09
CPPSA	0,42	13614407	29507834	4789293	0,80

Fuente. Datos de estudio

La reducción promedio para la calizas perpendiculares a la estratificación es de 4,93 para Young's Modulus, 1,46 Bulk Modulus y 48,30 en el Rigidity Modulos. (ver figura 8).

Grafico 8. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación vs Humedad para la caliza PP.



Fuente. Datos de estudio

6.3.2 Efectos de la humedad en parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para areniscas.

Al analizar los parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación enunciados en las tablas 23 y 24, se encontró una relación de 1,1 en estado natural, 1,09 en estado seco y 0,8 en estado saturado reflejando que la Relación de Poisson es mayor en el estado natural de estas rocas en sentido paralelo, que en cualquiera de los otros estados. Con el Modulus de Young's que es la relación entre el esfuerzo y la deformación es de 46,6 lo cual quiere decir que es un valor muy elevado para este tipo de roca. Del Modulus de Rigidity se observa que la variación entre las dos orientaciones de perforación es de 45,4 lo que se puede interpretar es que las rocas en estado seco es mucho más frágil en sentido paralelo que la que están extraídas en sentido perpendicular, y del Modulus de Bulk que mide la resistencia del material, se observó una relación de 7,49, es decir, que dicha resistencia aumenta en el sentido paralelo a la estratificación.

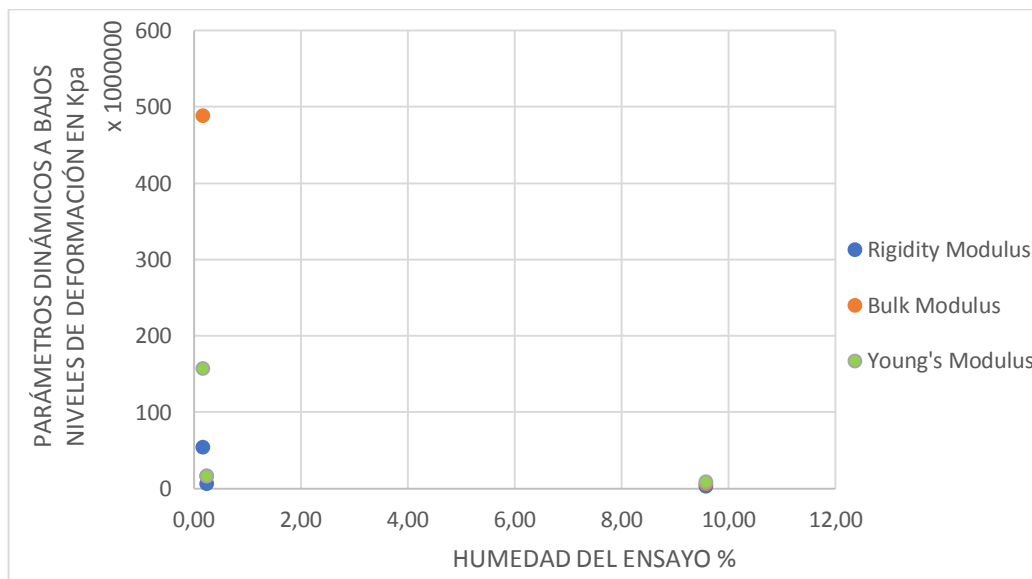
Tabla 23. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para Las areniscas P.

ARENISCAS PARALELAS					
TIPO DE ROCA Y ESTADO	PROMEDIO U-POISSON'S RATIO	PROMEDIO YOUNG'S MODULUS (Kpa)	PROMEDIO BULK MODULUS (KPa)	PROMEDIO RIGIDITY MODULUS (KPa)	PROMEDIO HUMEDAD DEL ENSAYO (%)
APN	0,33	16959974	16867814	6404263	0,24
APSE	0,45	156973049	488871750	54261119	0,18
APSA	0,28	8817235	6600148	3464956	9,58

Fuente. Datos de estudio

El grafico 9 nos muestra el factor de reducción promedio para la arenisca paralela a la estratificación que es de 16,8 para Young's Modulus, 73,06 Bulk Modulus y 48,99 en el Rigidity Modulos. (Ver gráfico 9).

Grafico 9. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación vs Humedad para las areniscas P.



Fuente. Datos de estudio

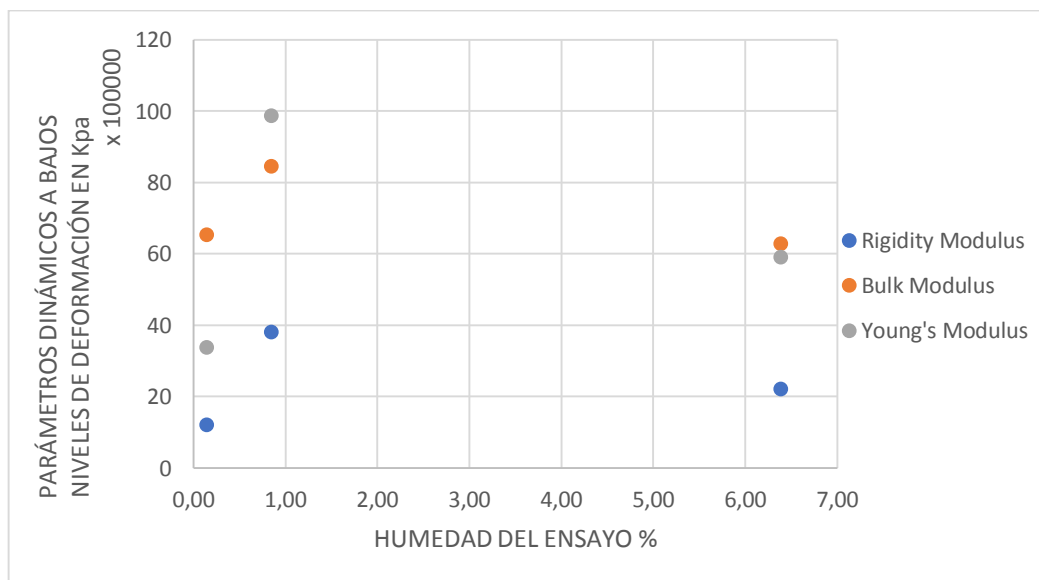
Tabla 24. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para las areniscas PP.

ARENISCAS PERPENDICULARES					
TIPO DE ROCA Y ESTADO	PROMEDIO U-POISSON'S RATIO	PROMEDIO YOUNG'S MODULUS (Kpa)	PROMEDIO BULK MODULUS (KPa)	PROMEDIO RIGIDITY MODULUS (KPa)	PROMEDIO HUMEDAD DEL ENSAYO (%)
APPN	0,30	9870543	8441403	3799395	0,84
APPSE	0,41	3364419	6522734	1192869	0,14
APPSA	0,34	5901154	6281056	2210171	6,38

Fuente. Datos de estudio

La siguiente grafica muestra el factor de reducción promedio para la areniscas perpendicular a la estratificación es de 1,93 para Young's Modulus, 0,34 Bulk Modulus y 2,18 en el Rigidity Modulos. Valores que en comparación con los de las areniscas en sentido paralelo tienen una reducción promedio inferior. (Ver grafica 10)

Grafico 10. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación vs Humedad para las areniscas PP.



Fuente. Datos de estudio

6.3.3 Efectos de la humedad en parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para el mineral de hierro.

Para tablas 25 y 26, se encontró una relación de 1,66 en estado natural, 0,83 en estado seco y 0,94 en estado saturado, reflejando que la Relación de Poisson es mayor en el estado natural de estas rocas en sentido paralelo, que en cualquiera de los otros estados. Con el Modulus de Young's que es la relación entre el esfuerzo y

la deformación es de 3,85 está dentro del rango para este tipo de roca. Del Modulus de Rigidity se observa que la variación entre las dos orientaciones de perforación es de 35,29 lo que se puede interpretar es que las rocas en estado seco es mucho más frágil en sentido paralelo que la que están extraídas en sentido perpendicular, y del Modulus de Bulk que mide la resistencia del material, se observó una relación de 2,06, es decir, que dicha resistencia aumenta en el sentido paralelo a la estratificación.

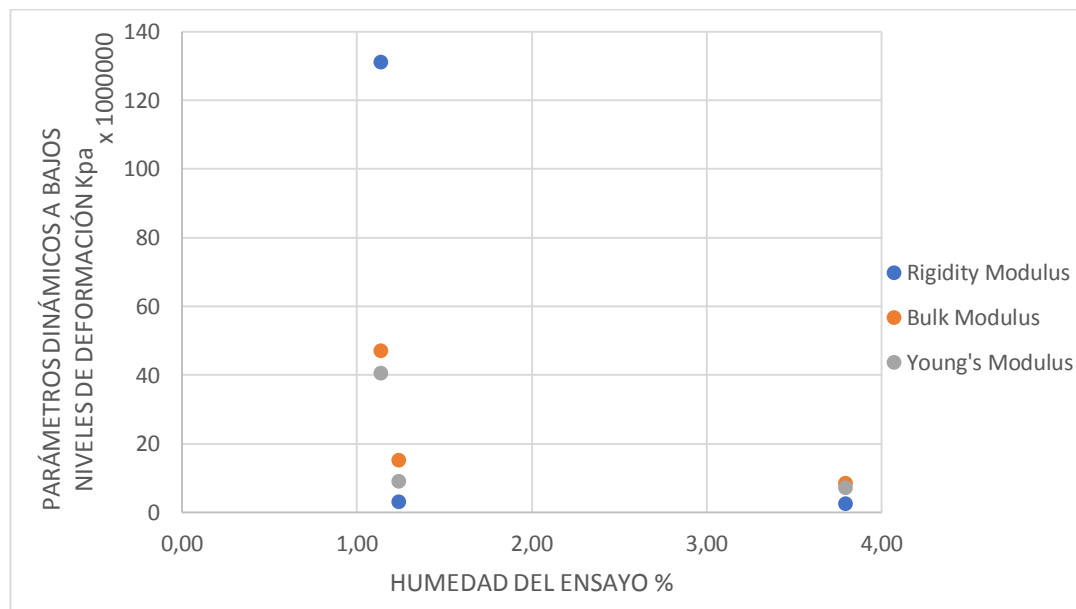
Tabla 25. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para el mineral de hierro P.

MINERAL DE HIERRO PARALELA					
TIPO DE ROCA Y ESTADO	PROMEDIO U-POISSON'S RATIO	PROMEDIO YOUNG'S MODULUS (Kpa)	PROMEDIO BULK MODULUS (KPa)	PROMEDIO RIGIDITY MODULUS (KPa)	PROMEDIO HUMEDAD DEL ENSAYO (%)
AFPN	0,40	9052116	15256657	3230475	1,24
AFPSE	0,35	40607679	47176098	131168030	1,14
AFPSA	0,36	7267753	8534877	2677031	3,80

Fuente. Datos de estudio

En el siguiente grafico se observa el factor de reducción promedio para el mineral de hierro paralelo a la estratificación es de 4,58 para Young's Modulus, 0,81 Bulk Modulus y 48,99 en el Rigidity Modulos. (ver gráfico 11).

Grafico 11. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación vs Humedad para el mineral de hierro P.



Fuente. Datos de estudio

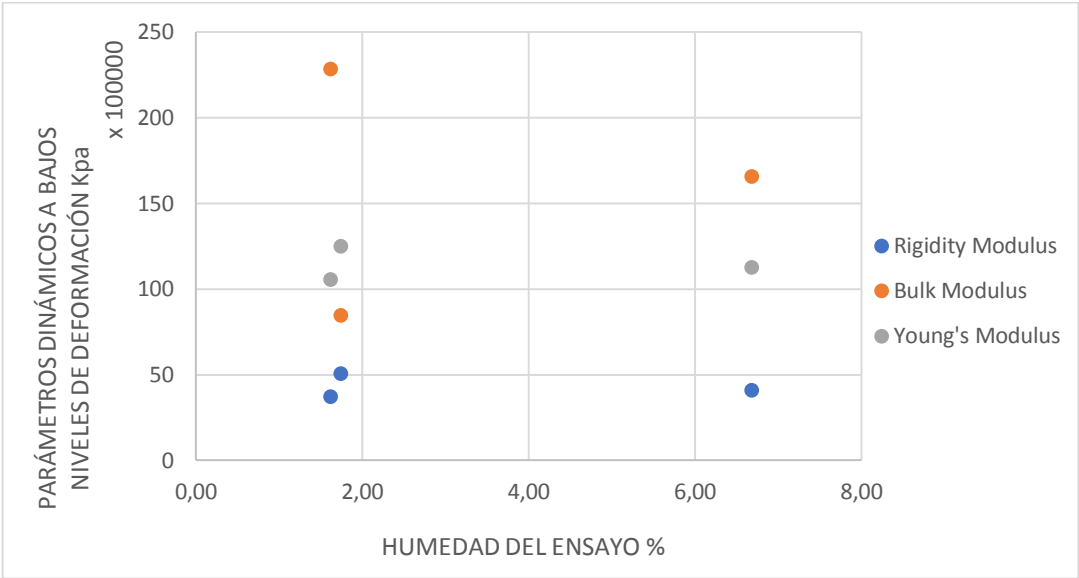
Tabla 26. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación para el mineral de hierro PP.

MINERAL DE HIERRO PERPENDICULAR					
TIPO DE ROCA Y ESTADO	PROMEDIO U- POISSON’S RATIO	PROMEDIO YOUNG’S MODULUS (Kpa)	PROMEDIO BULK MODULUS (KPa)	PROMEDIO RIGIDITY MODULUS (KPa)	PROMEDIO HUMEDAD DEL ENSAYO (%)
AFPPN	0,24	12501963	8449531	5055723	1,73
AFPPSE	0,42	10535445	22847409	3717257	1,61
AFPPSA	0,38	11275174	16581837	4071689	6,68

Fuente. Datos de estudio

La grafica 12 muestra el factor de reducción promedio para el mineral de hierro perpendicular a la estratificación es de 0,18 para Young’s Modulus, 1,7 Bulk Modulus y 0,36 en el Rigidity Modulos. Valores que en comparación con los del mineral de hierro en sentido paralelo tienen una reducción promedio inferior.

Grafico 12. Parámetros dinámicos a bajos niveles de deformación vs Humedad para el mineral de hierro PP.



Fuente. Datos de estudio

CONCLUSIONES

- Para la roca caliza tanto paralela como perpendicular disminuye la velocidad de onda P a medida que aumenta la humedad, en el caso de las perpendiculares la humedad se mantiene constante, mientras que la velocidad de propagación de la onda S se redujo en un 75% debido al decaimiento de la humedad para las rocas paralelas y en las perpendiculares la reducción es del 120%.
- En las areniscas paralelas y perpendiculares hubo una reducción de la velocidad de propagación de onda P, la cual es mayor en las perpendiculares, debido al incremento de la humedad y en cuanto a la velocidad de onda S hubo una reducción tanto en las rocas paralelas como en las perpendiculares, debido al incremento de la humedad en cada una de estas.
- El mineral de hierro tuvo una disminución de la velocidad de propagación de las ondas P y S en las dos orientaciones de perforación debido al aumento de la humedad.
- la caliza debido a su composición mineralógica, tiene la capacidad de permitir que la velocidad de propagación de ondas P y S sea mucho mayor que las otras litologías de estudio.
- Según la clasificación de Saroglou & Tsiambaos, Saroglou, H.; Tsiambaos, G, las calizas, areniscas y mineral de hierro evaluadas en los tres estados están dentro del rango de pobremente anisotropicos.

RECOMENDACIONES

- Realizar ensayos de difracción de rayos x para encontrar cualitativa y cuantitativamente los minerales presentes en cada roca.
- Desarrollar una comparación con los ensayos mecánicos para las propiedades encontradas por el método de ultrasonido.
- Trasladar el equipo de ultrasonido GCTS Testing Systems CATS Ultrasónicas 1.83 a un lugar con las condiciones acústicas adecuadas, para un óptimo desarrollo del ensayo.
- Implementar el método de saturación de Lugeon para garantizar las condiciones del ensayo de humedad máxima.

BIBLIOGRAFÍA

- Aponte, A., Evaluación de Métodos No Convencionales de Caracterización Geotécnica, Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Bogotá D.C, 2011.
- Bulk Elastic Properties en hyperphysics de la universidad de Georgia
- Callister, Jr., William D (2005), Fundamentals of Materials Science and Engineering (2ª edición), United States of America
- Correa Arroyave, A., Serie completa de los métodos recomendados por la ISRM para la caracterización de rocas en laboratorio. (Segunda edición, 2013)
- Gonzalez de Vallejo, L., Ferrer M.,Ortuño L & Oteo C. Ingeniería Geológica (2004).
- Morales A & Sierra G., Estimación de la Resistencia y análisis de estabilidad de pilares en la mina de roca fosfórica “CAROLINA” mediante la aplicación de métodos no destructivos (2011).
- Ortiz Berrocal, L., Elasticidad, McGraw-Hill, 1998
- Plancha 172 INGEOMINAS
- REYES CHITTARO ITALO, Geología de la Región de Duitama- Sogamoso- Paz de Rio (Departamento de Boyacá), Belencito, Abril de 1.984.
- Saroglou & Tsiambaos, Saroglou, H.; Tsiambaos, G., 2007. Classification of anisotropic rocks. 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics. In: Ribeiro e Sousa, Otalla, Grossmann, editors. Taylor & Francis Group, London, pp. 191-196.
- W.A. Wooster, Tensors and group theory for the physical properties of crystals, Clarendon Press, Oxford, 1973.

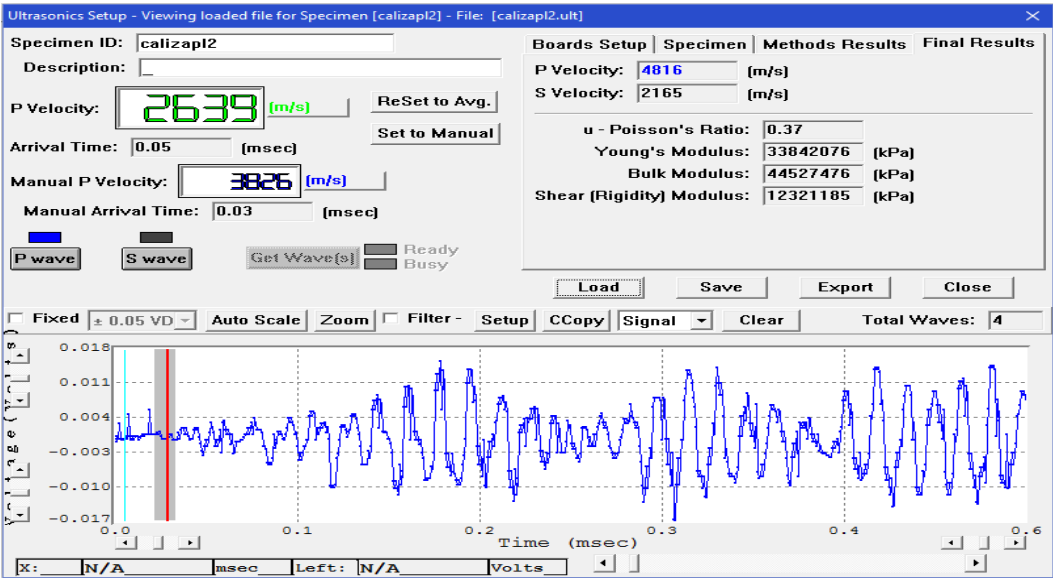
ANEXOS

ENSAYO DE ULTRASONIDO

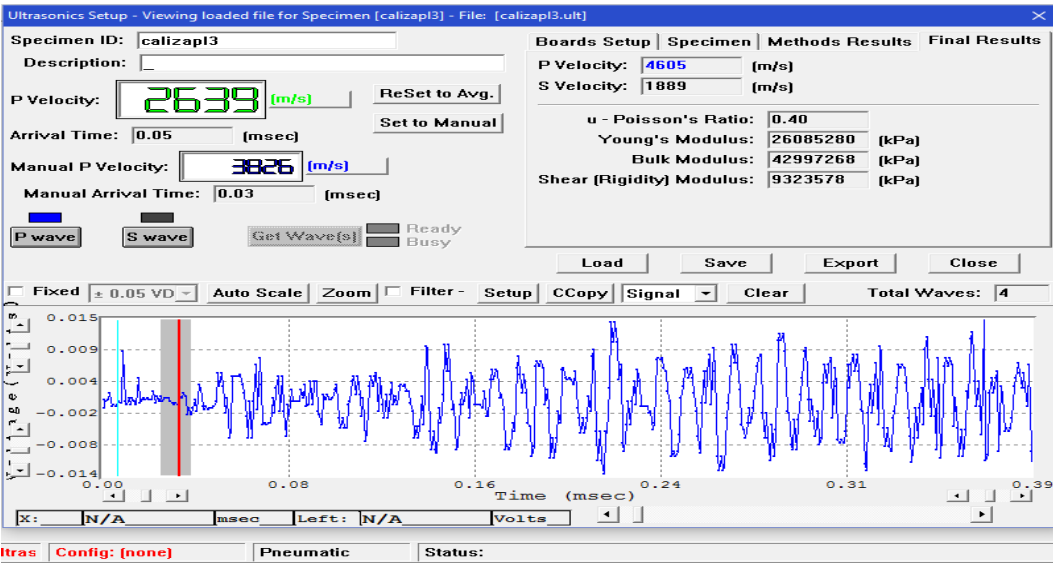
ANEXO A. ESTADO NATURAL DE LAS ROCAS

CALIZAS PARALELAS (CPN)

CPN02

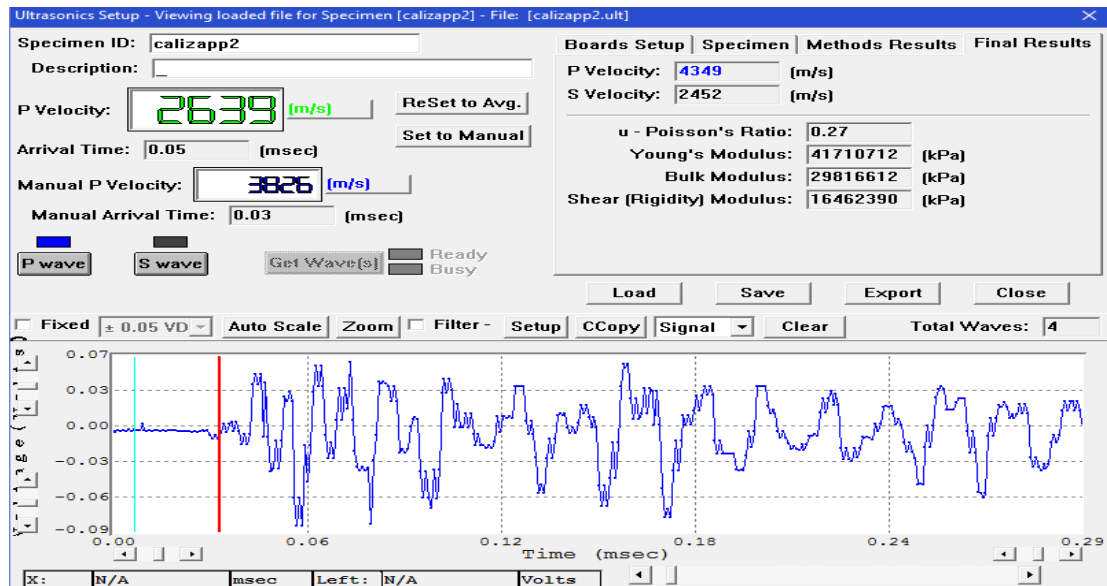


CPN03

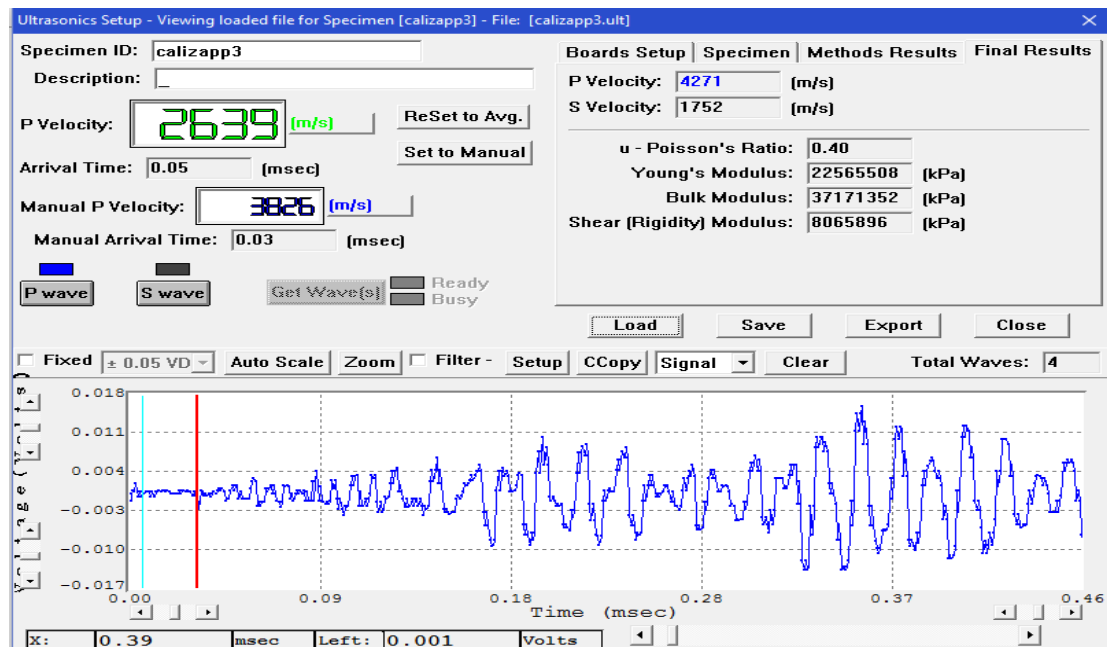


CALIZAS PERPENDICULARES (CPPN)

CPPN02

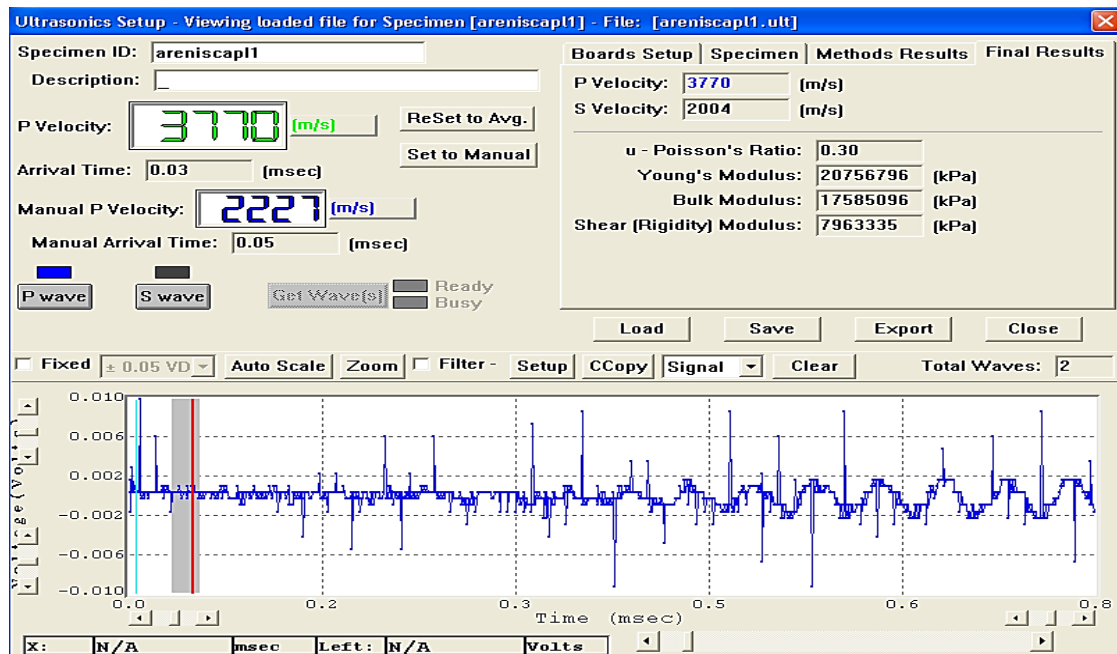


CPPN03

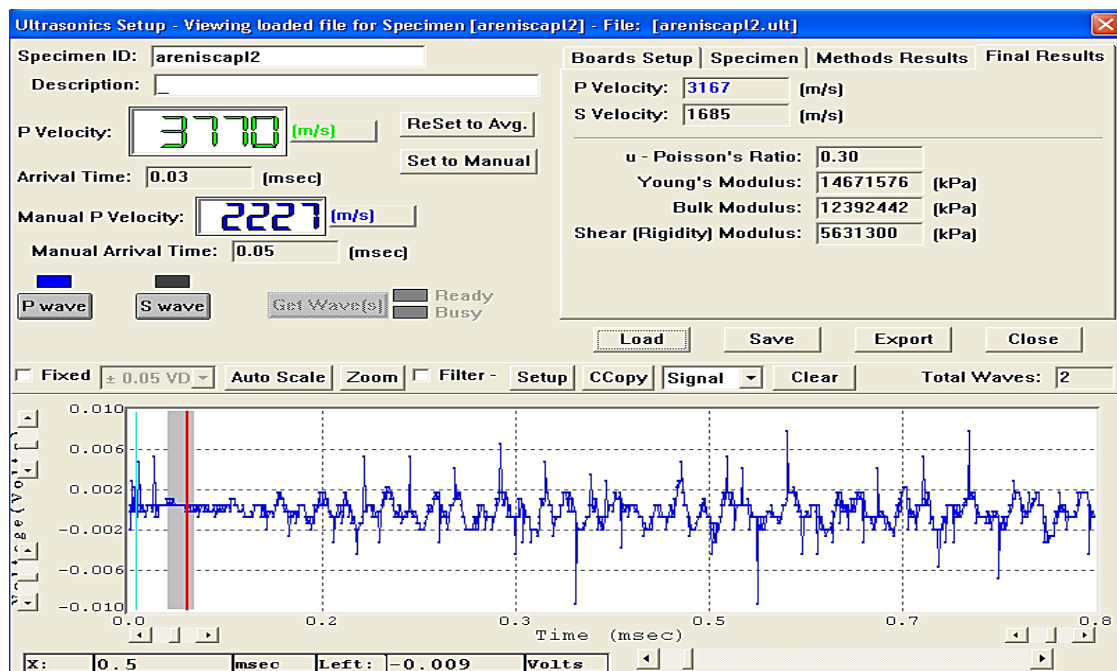


ARENISCAS PARALELAS (APN)

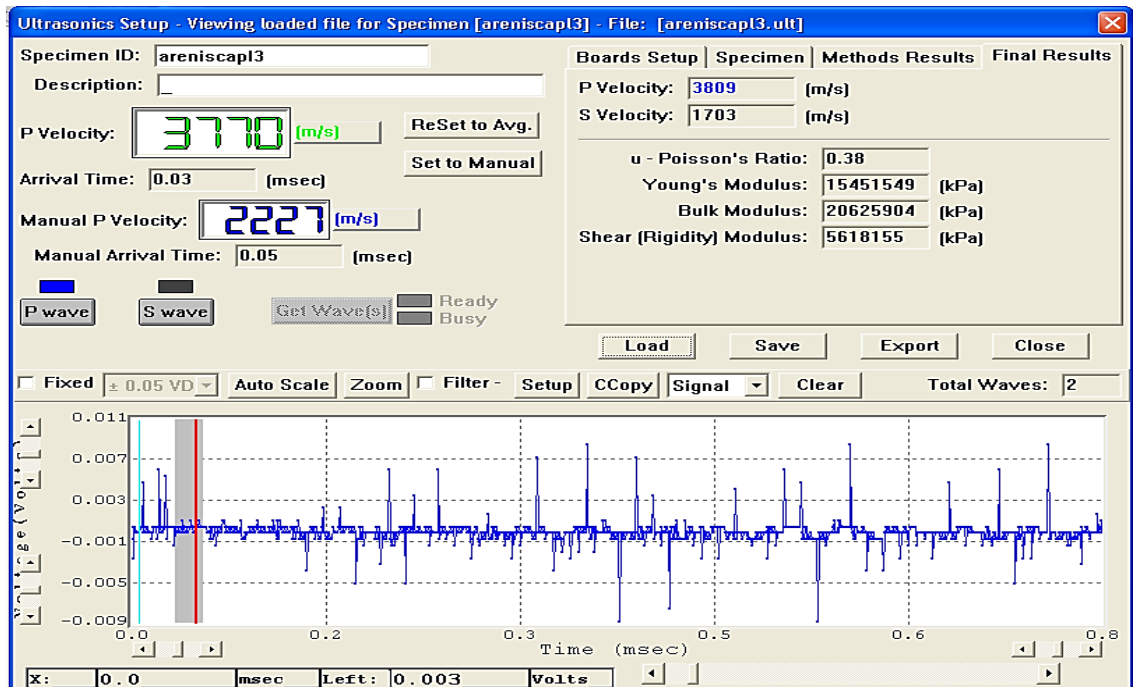
APN01



APN02

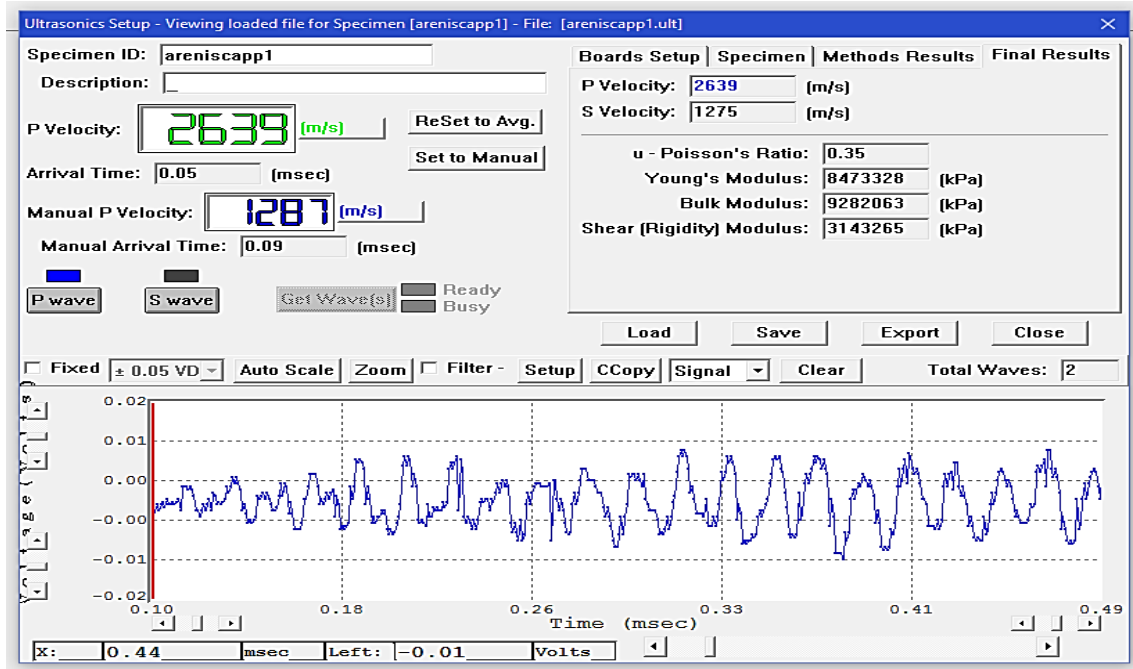


APN03

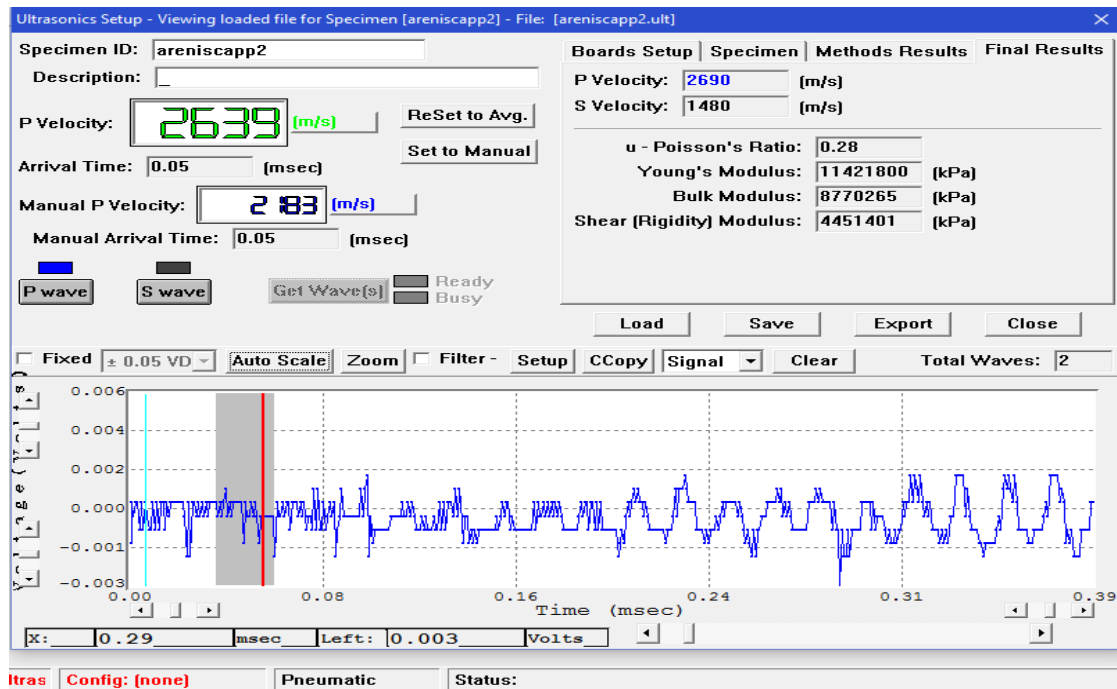


ARENISCAS PERPENDICULARES (APPN)

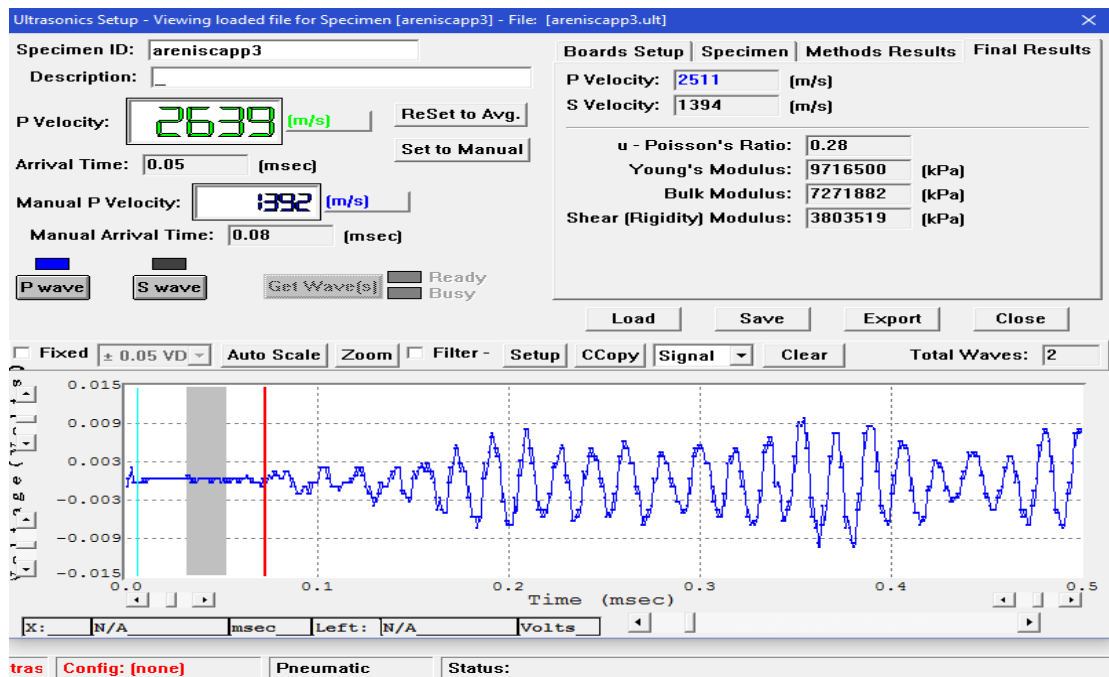
APPN01



APPN02

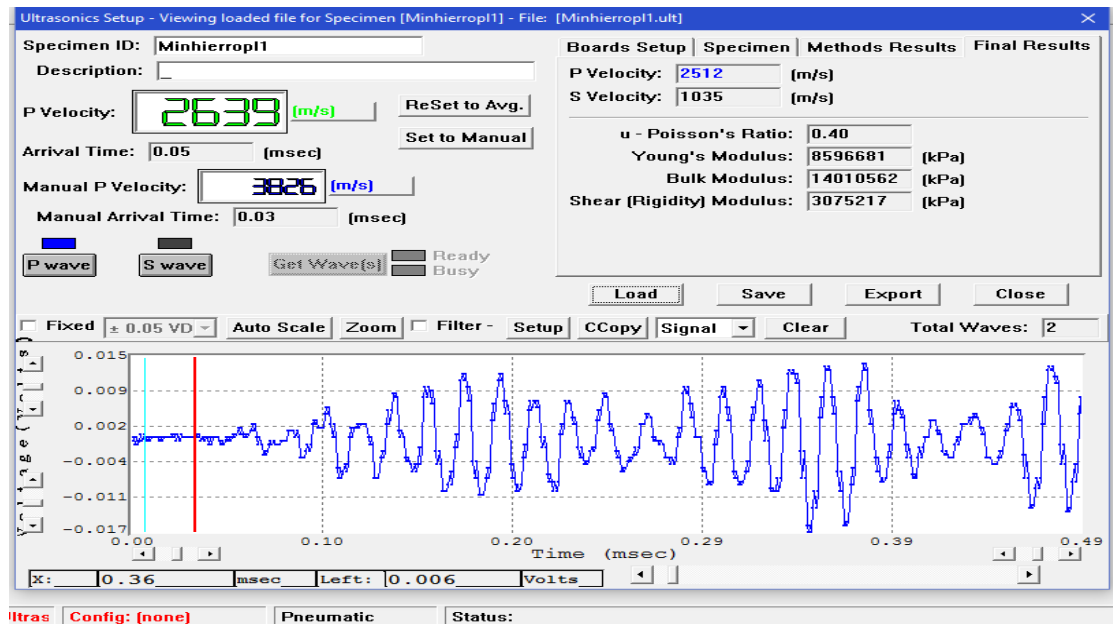


APPN03

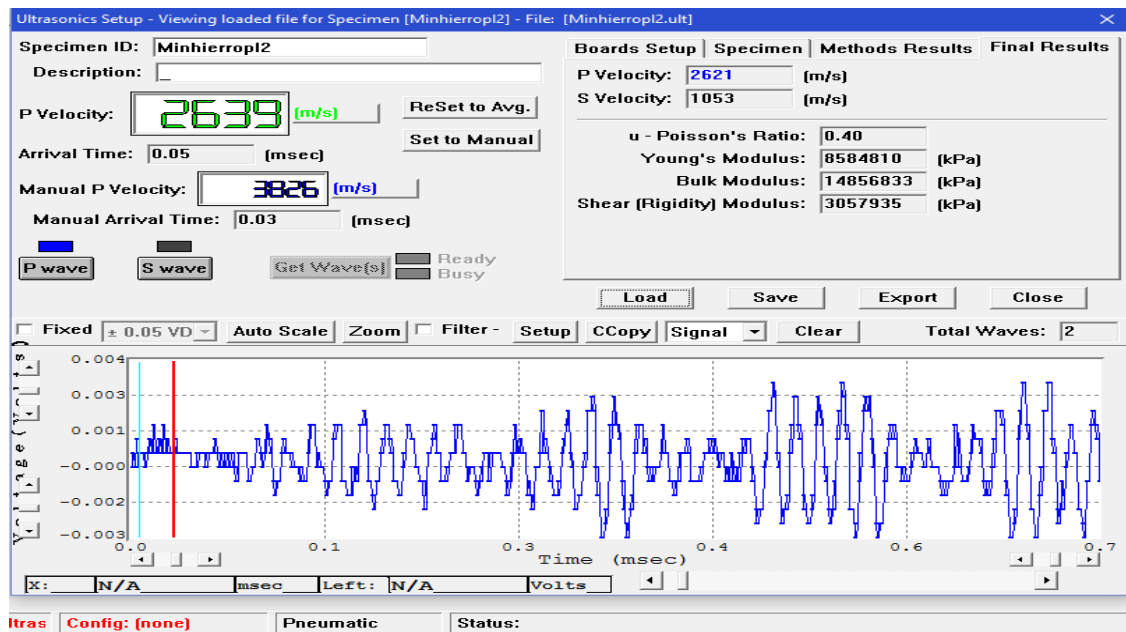


MINERAL DE HIERRO PARALELAS (AFPN)

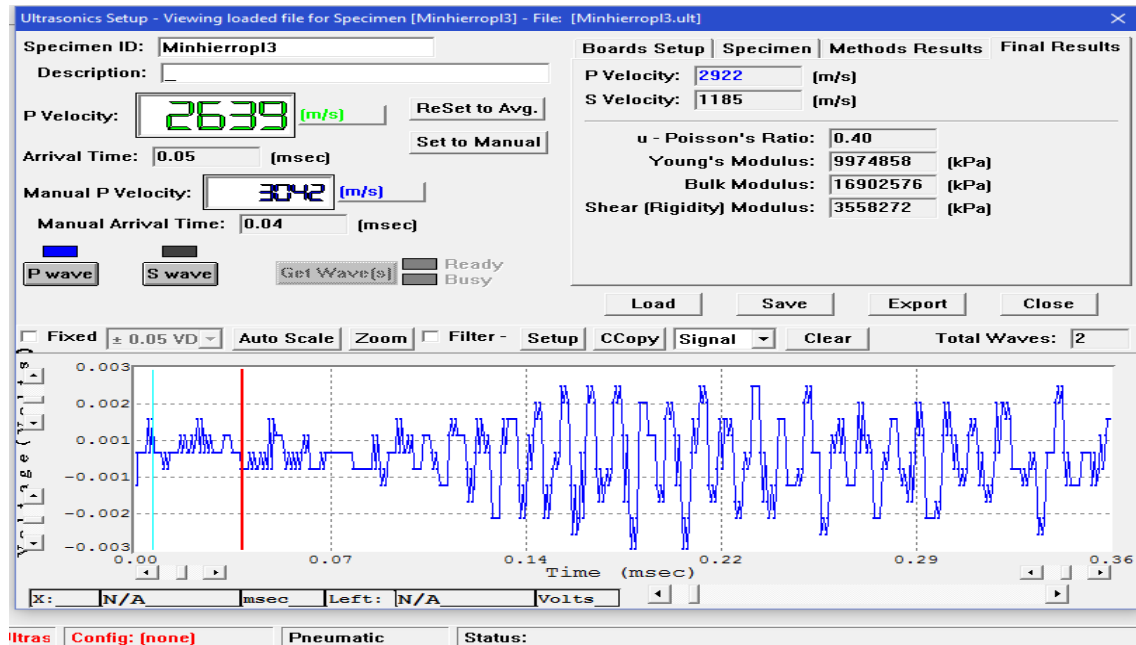
AFPN01



AFPN02

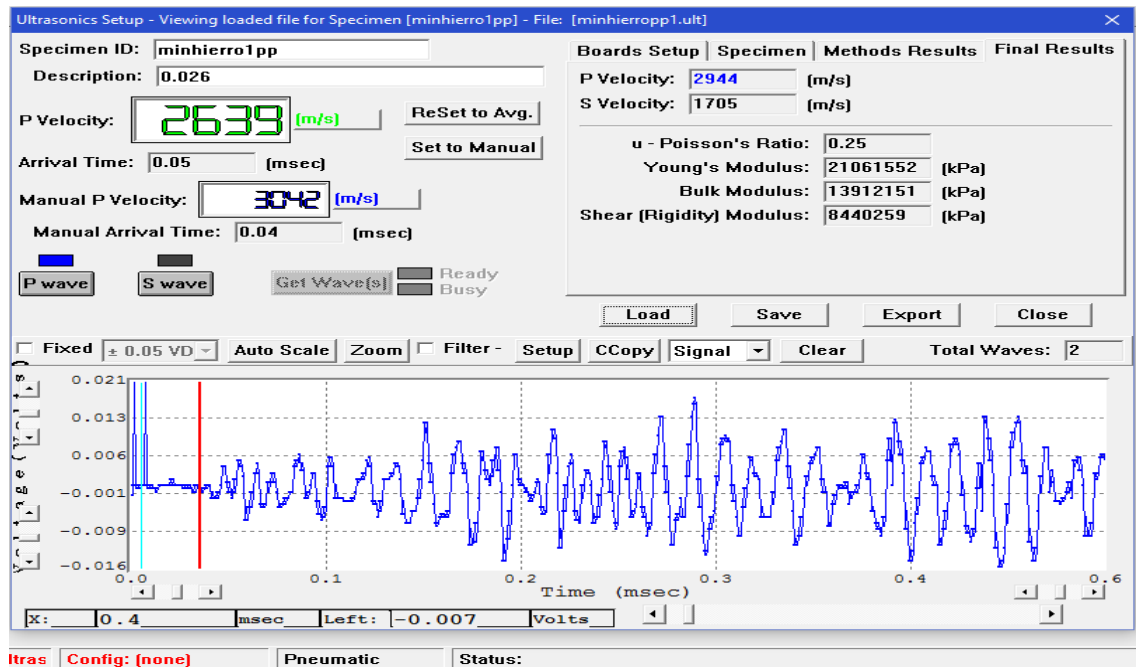


AFPN03

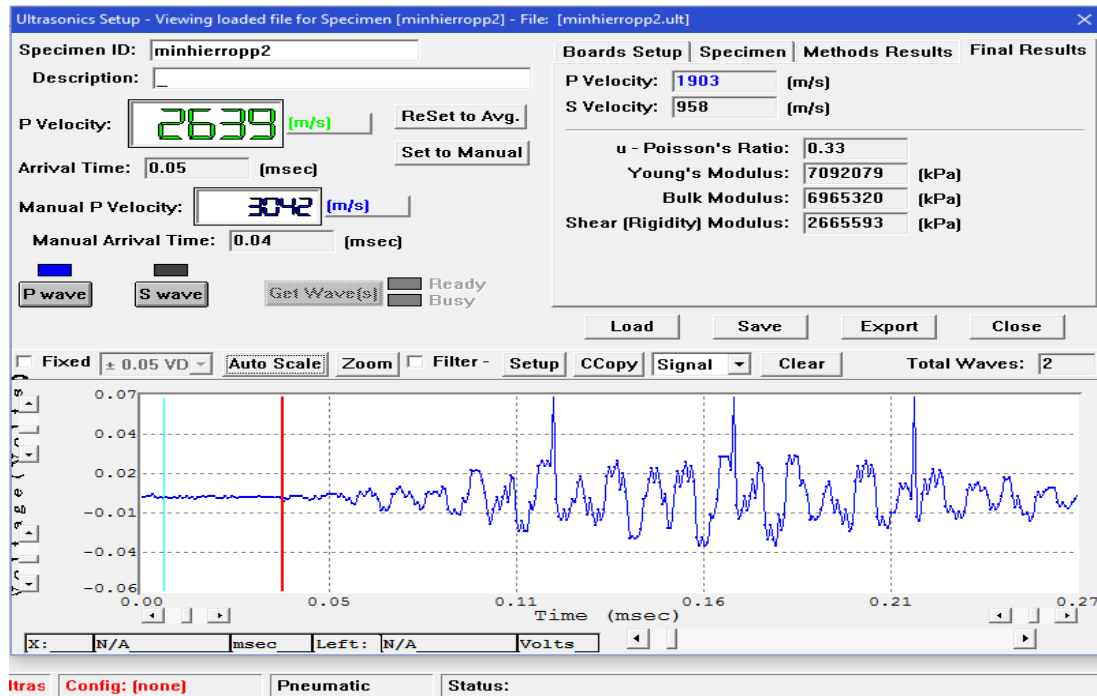


MINERAL DE HIERRO PERPENDICULARES (AFPPN)

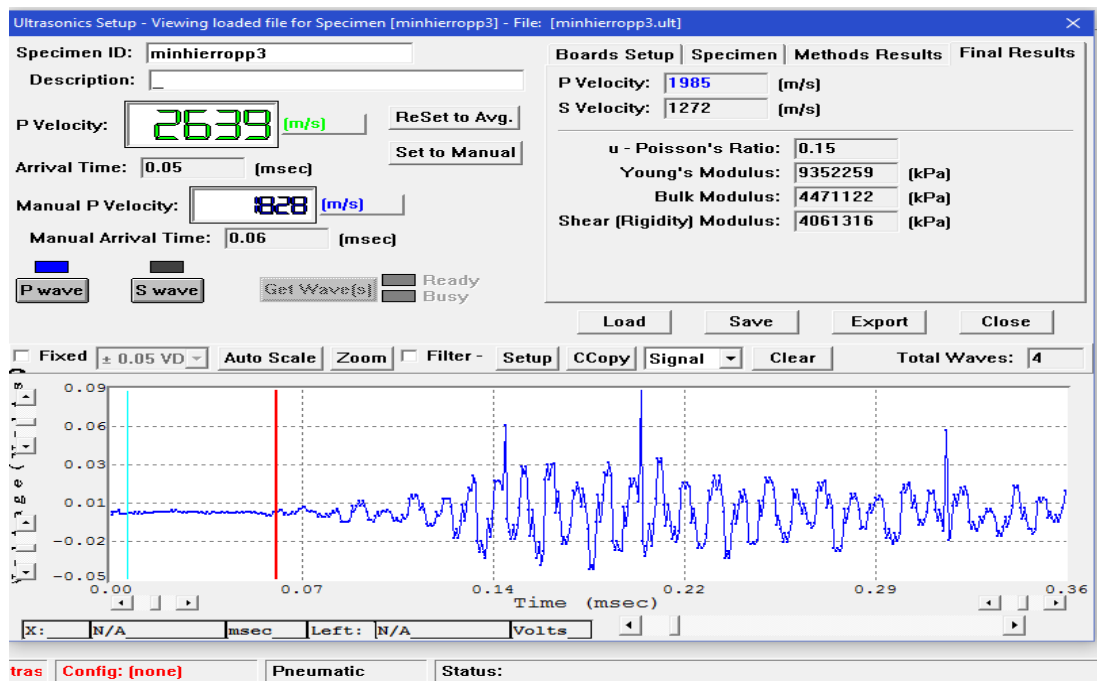
AFPPN01



AFPPN02



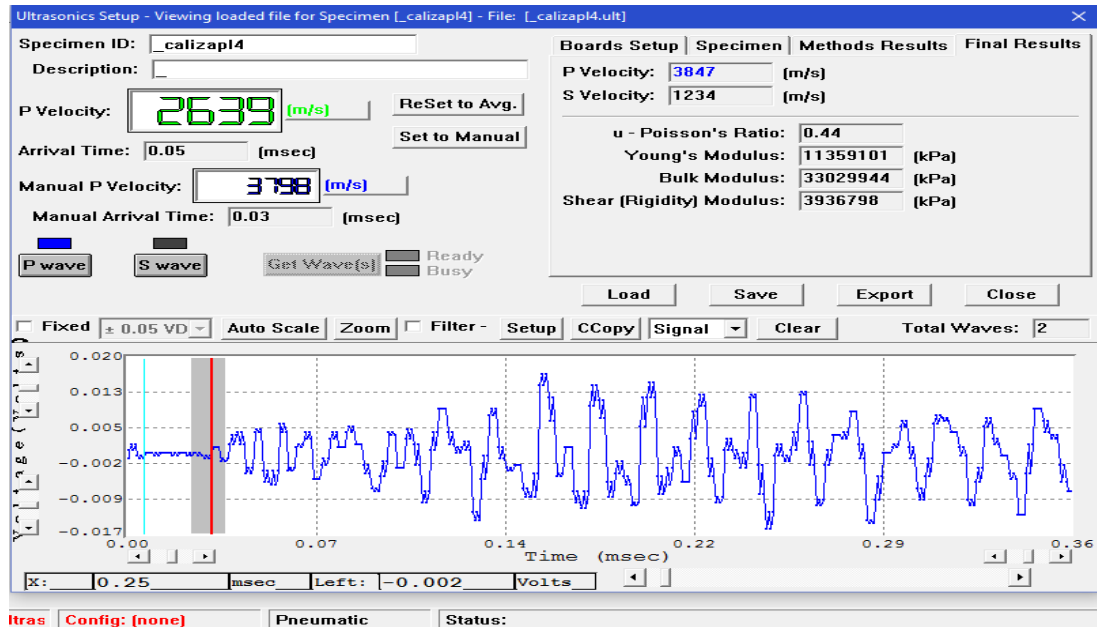
AFPPN03



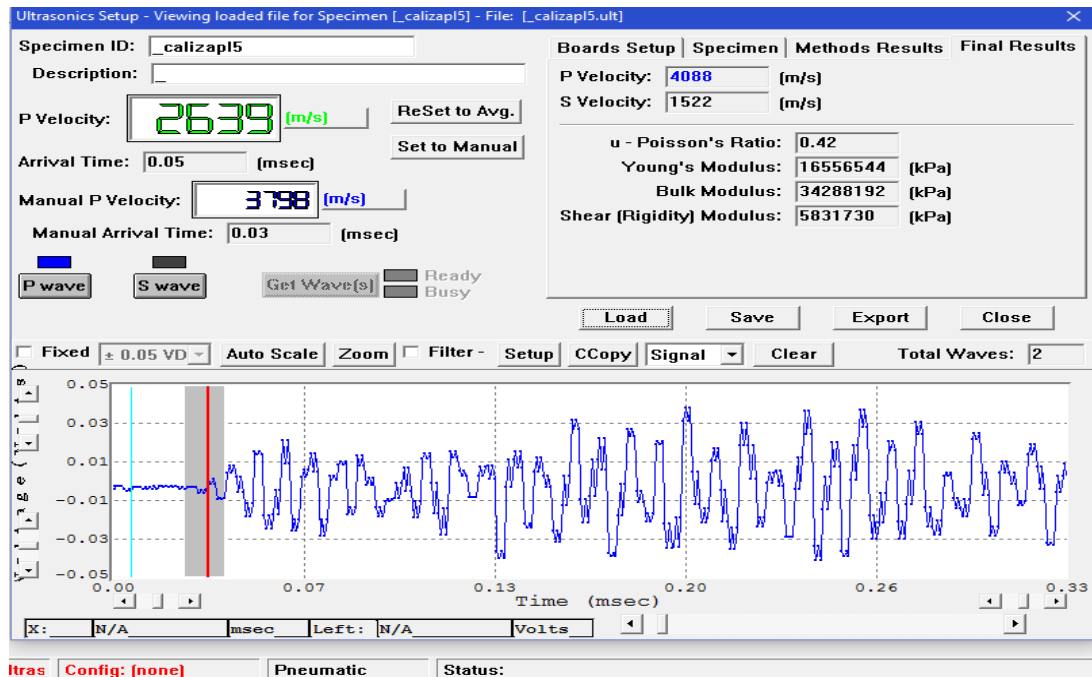
ANEXO B. ESTADO SECO DE LAS ROCAS

CALIZA PARALELA (CPSE)

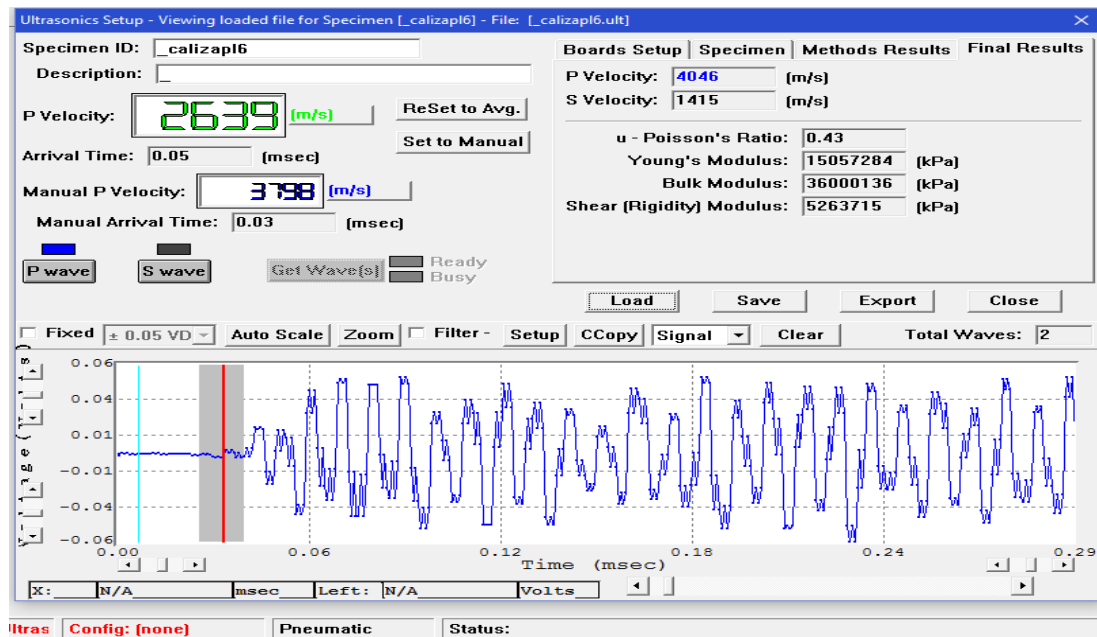
CPSE04



CPSE05

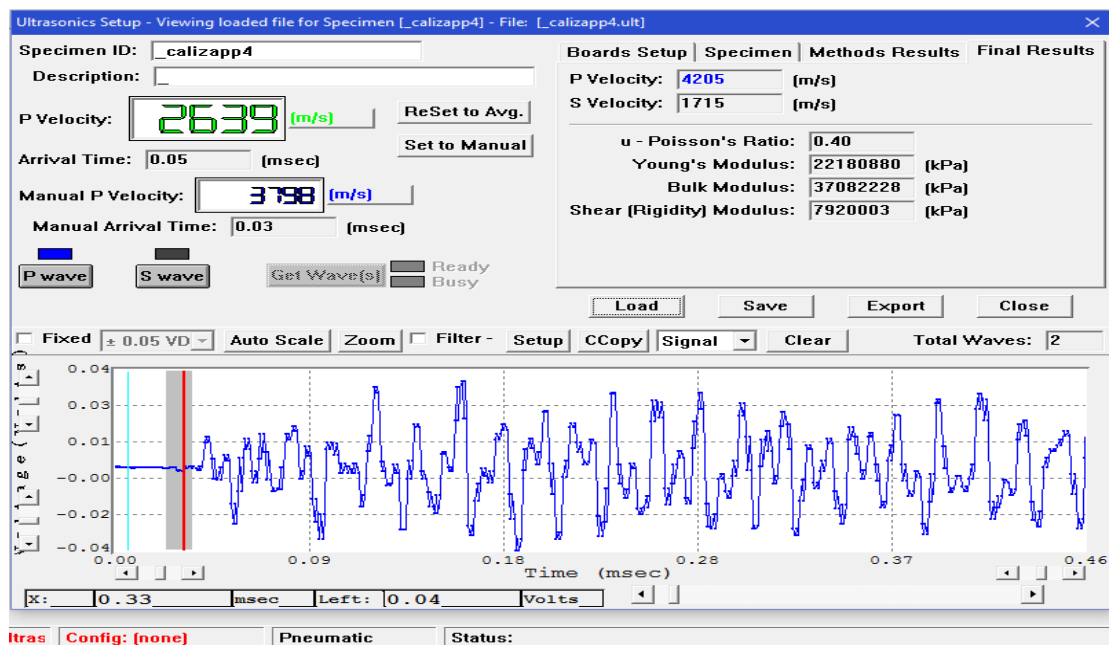


CPSE06

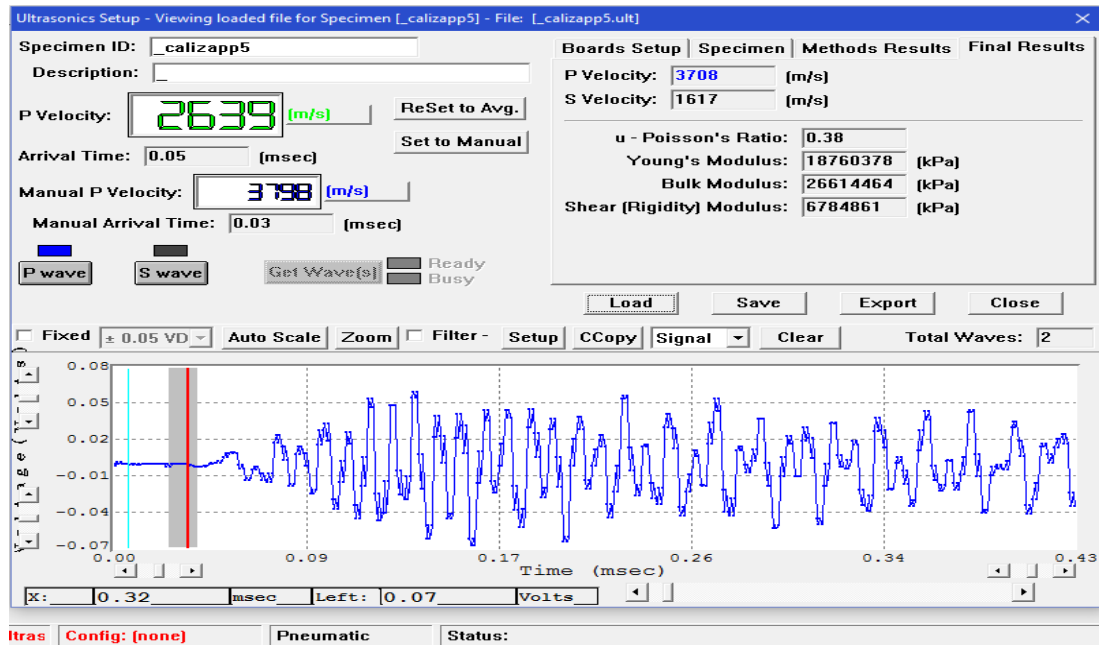


CALIZA PERPENDICULAR (CPPSE)

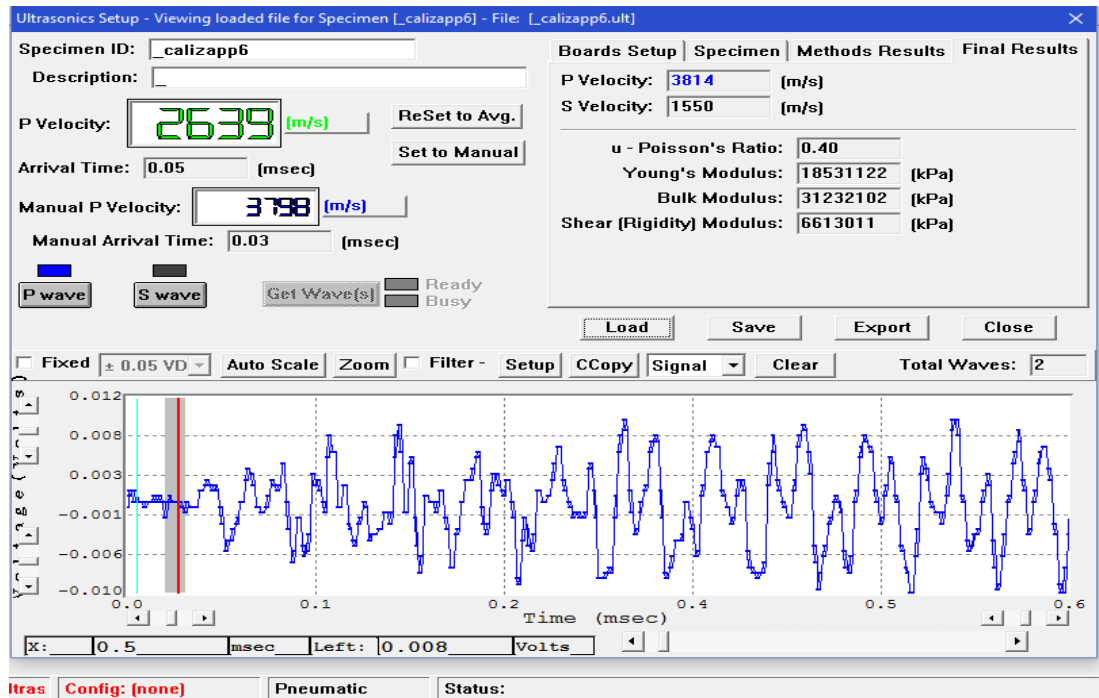
CPPSE04



CPPSE05

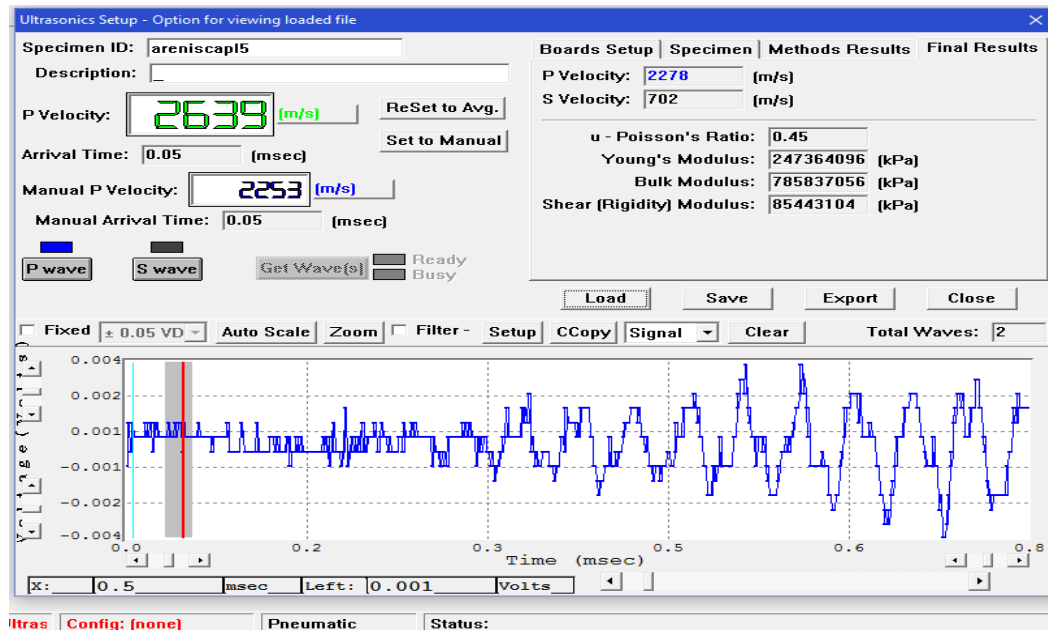


CPPSE06

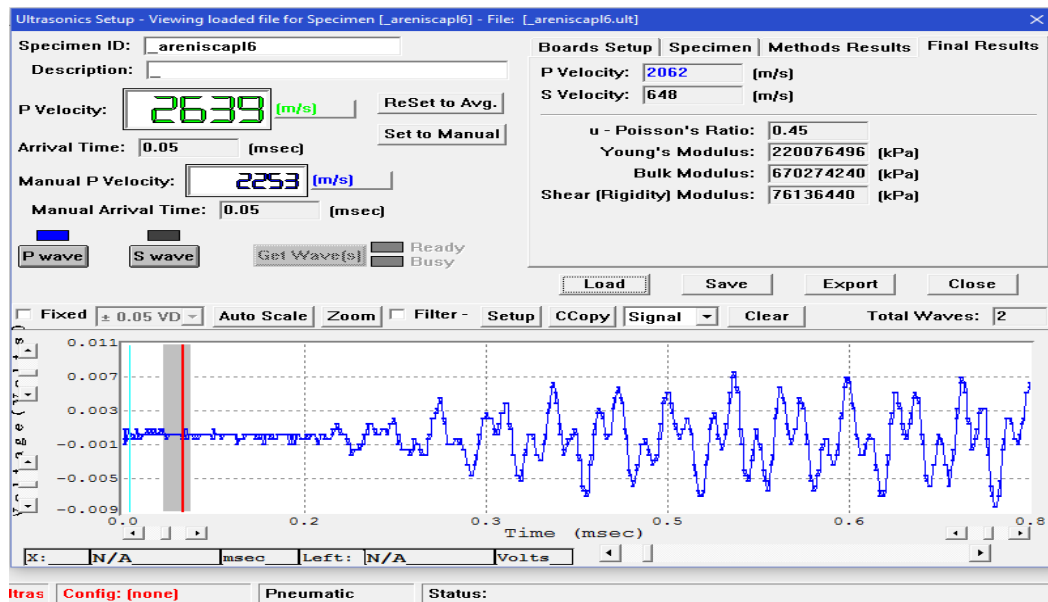


ARENISCA PARALELA (APSE)

APSE05

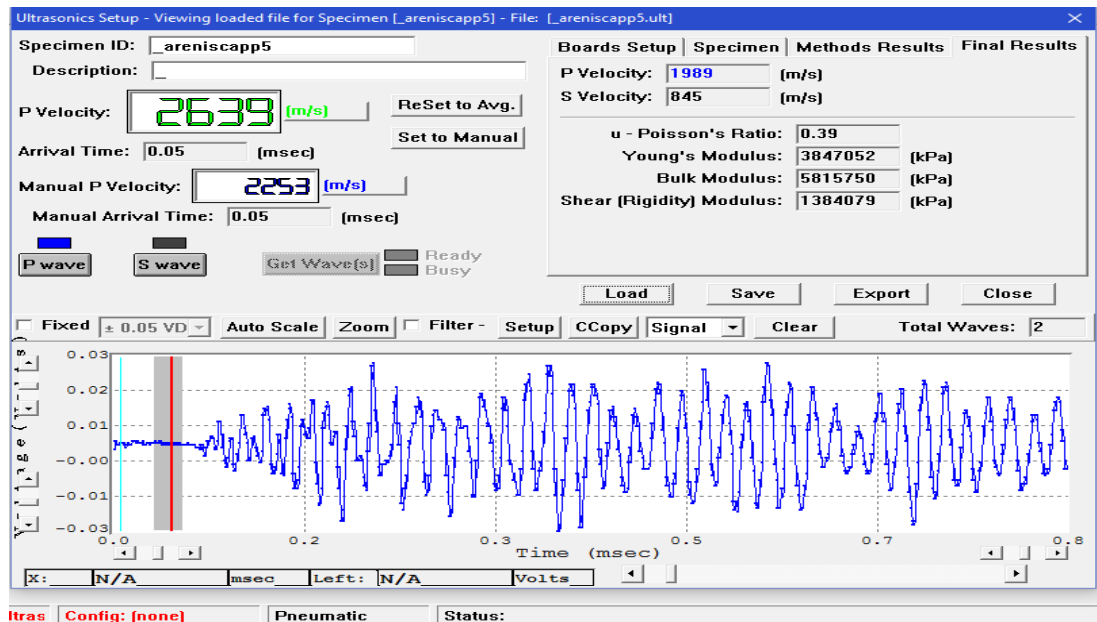


APSE06

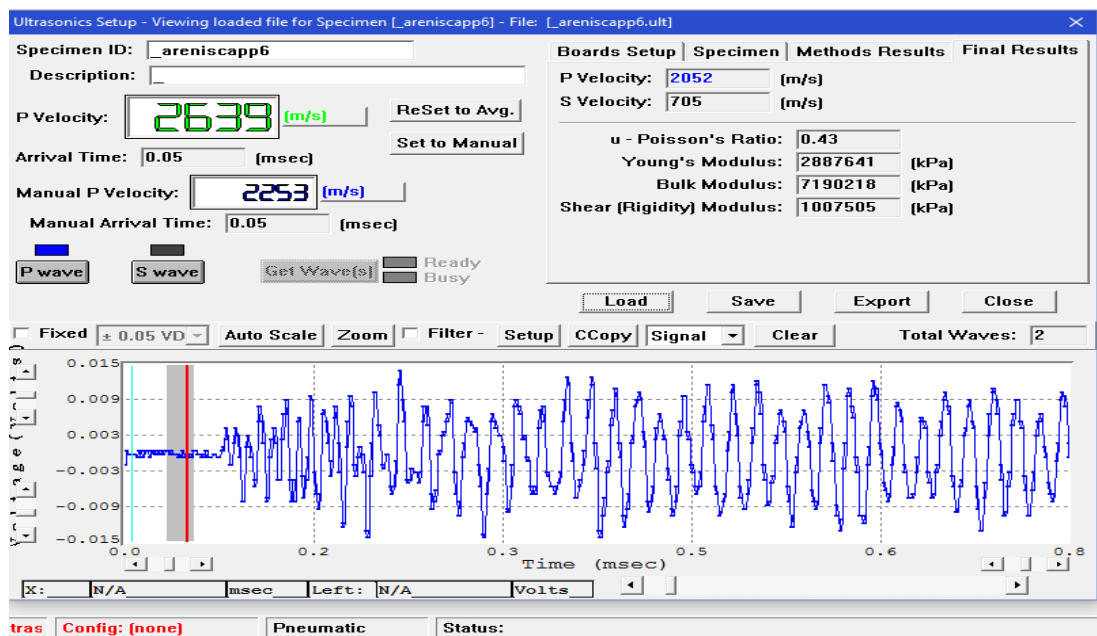


ARENISCA PERPENDICULAR (APPSE)

APP05

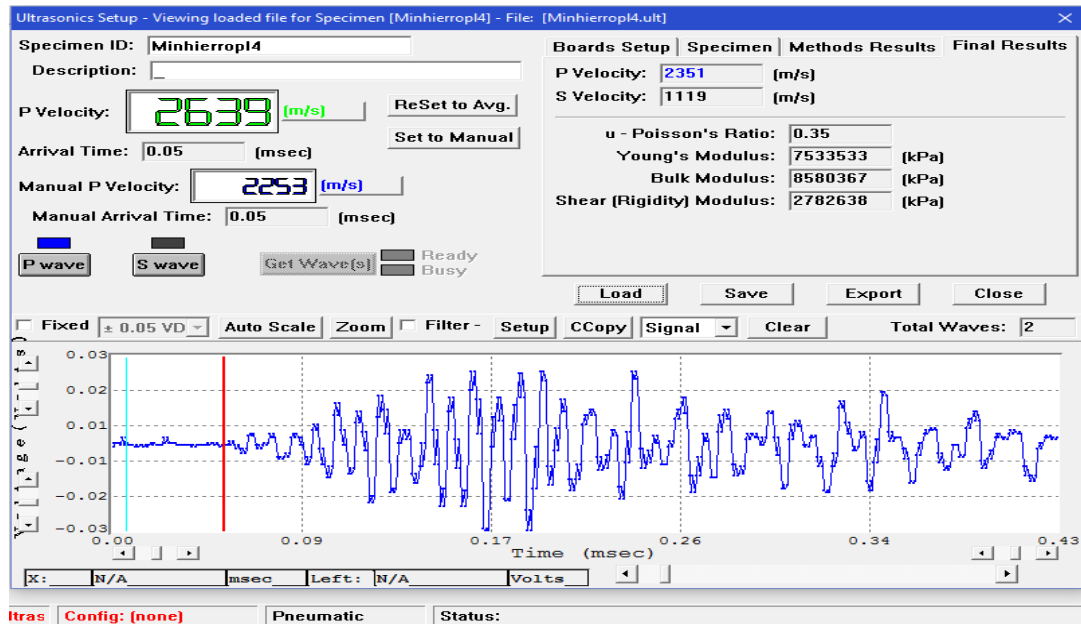


APPSE06

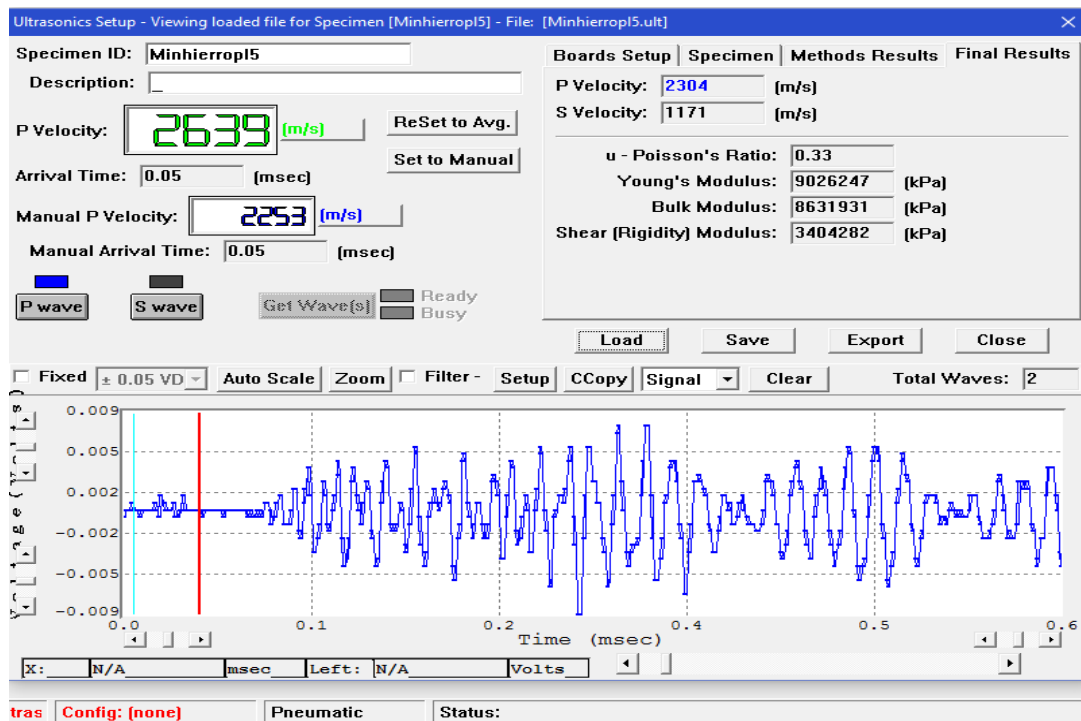


MINERAL DE HIERRO PARALELA (AFPSE)

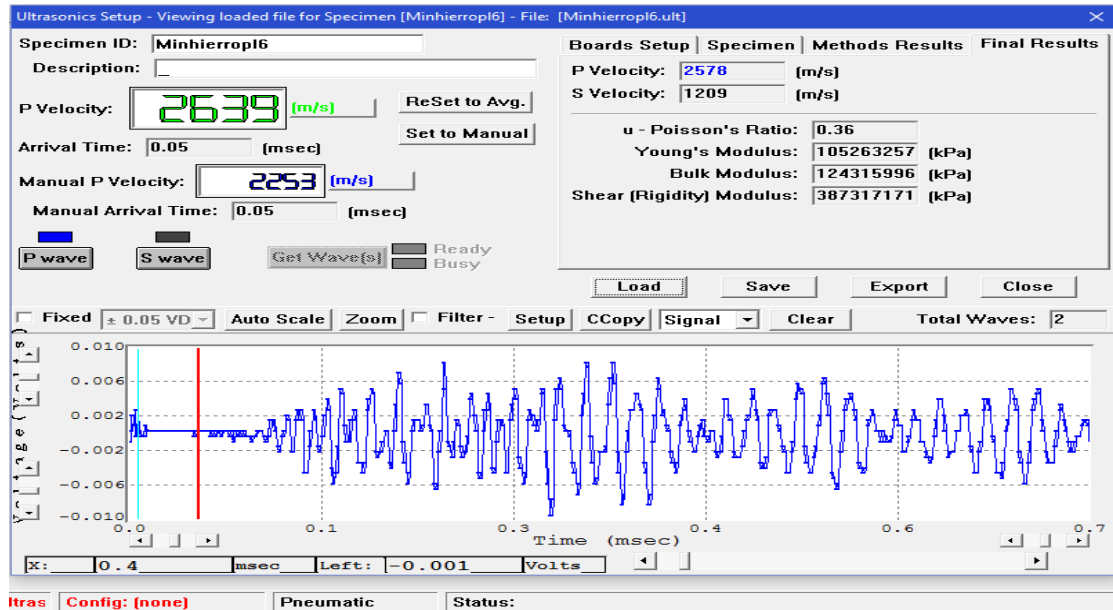
AFPSE04



AFPSE05

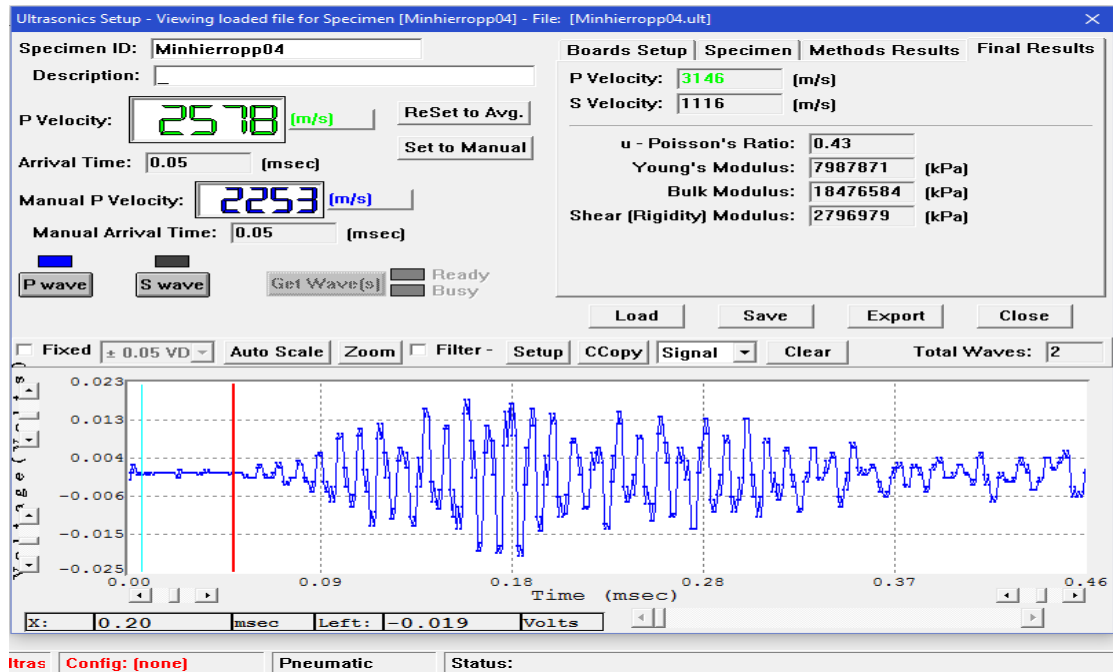


AFPSE06

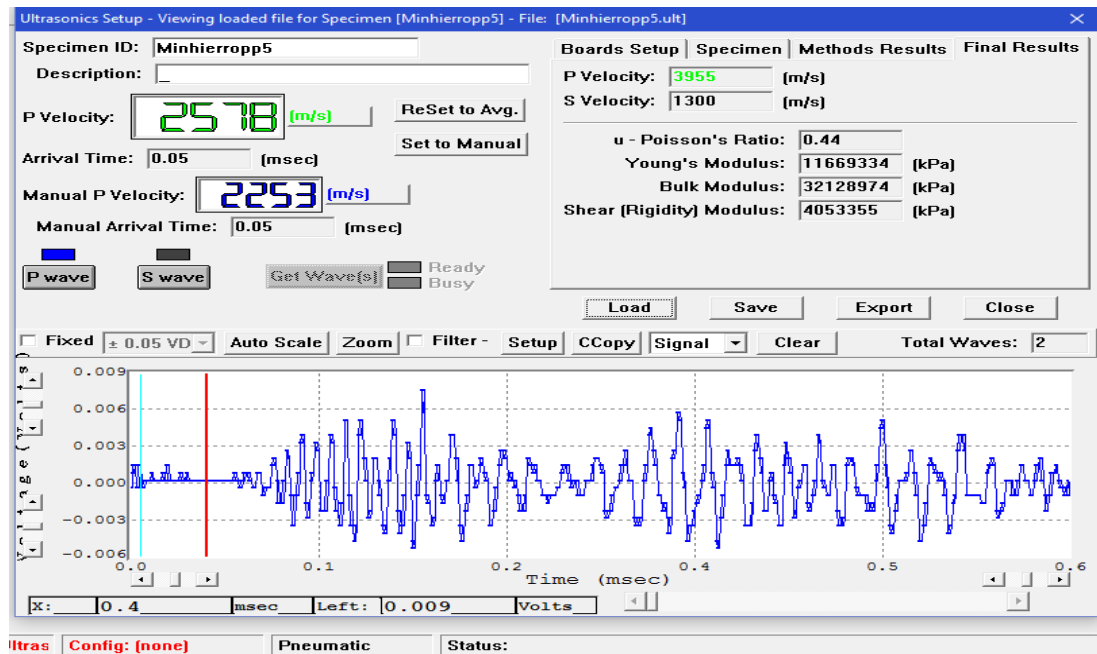


MINERAL DE HIERRO PERPENDICULAR (AFPPSE)

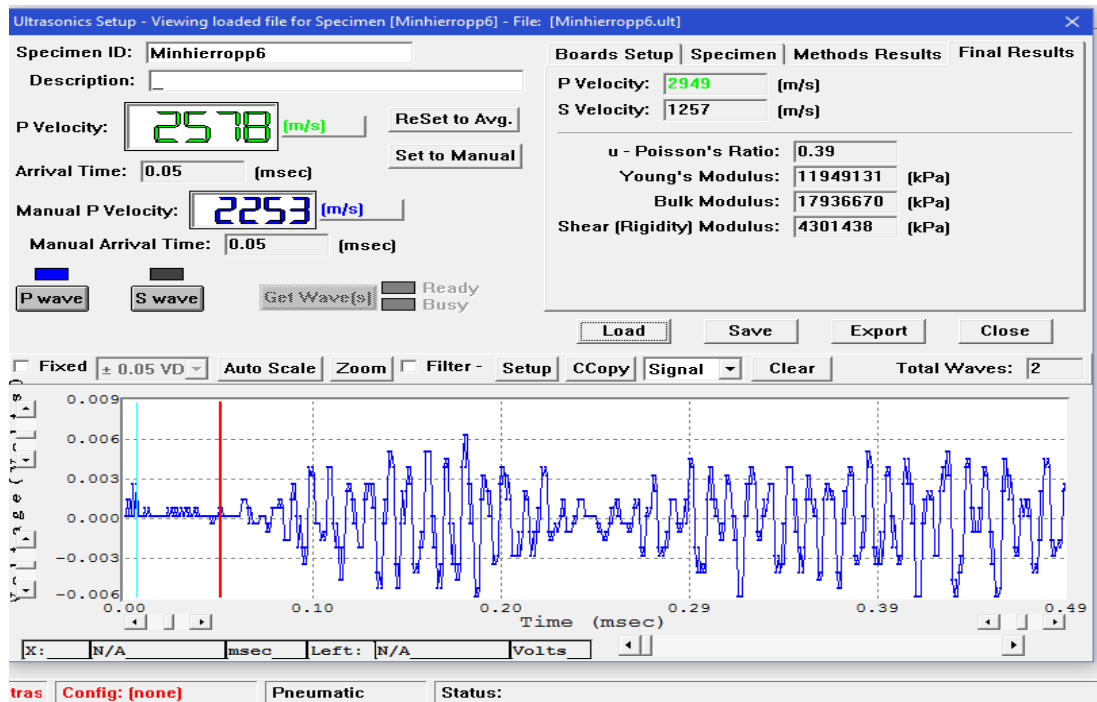
AFPPSE04



AFPPSE05



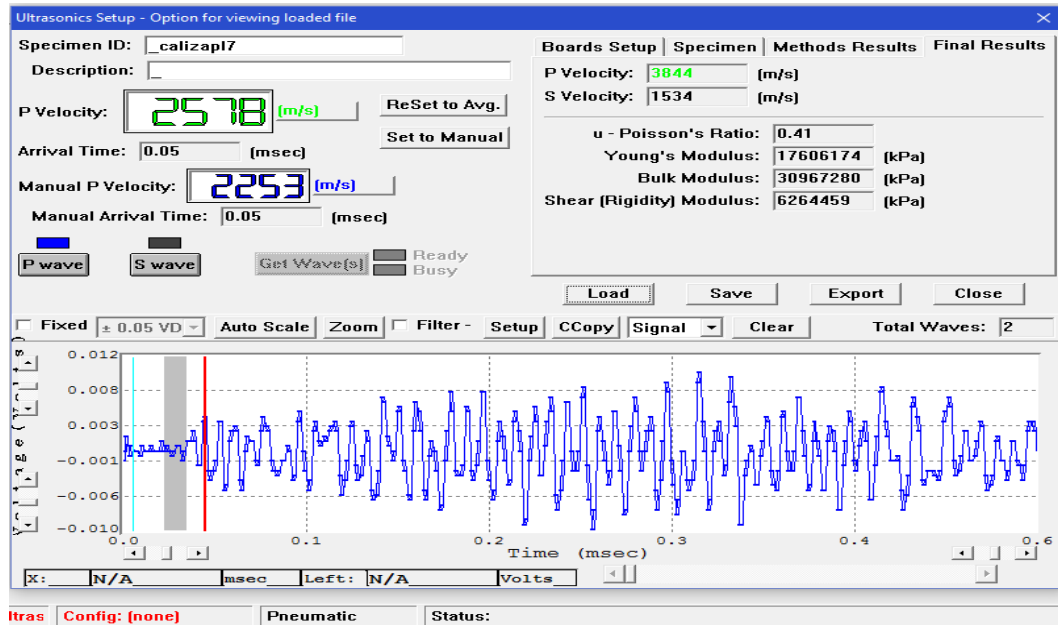
AFPPSE06



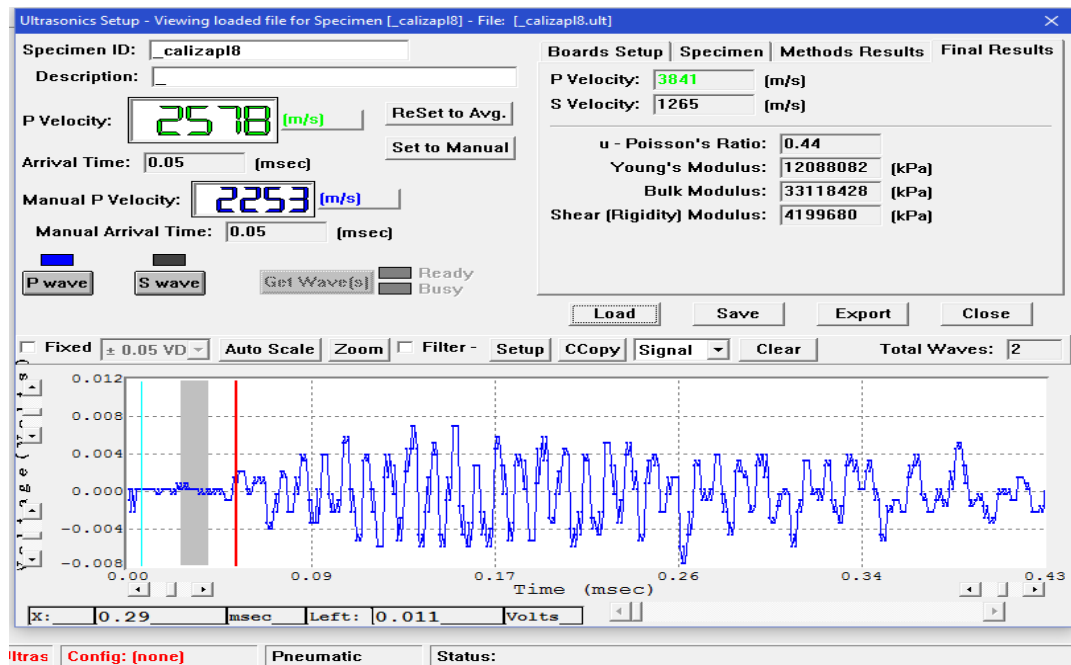
ANEXO C. ESTADO SATURADO DE LA ROCAS

CALIZA PARALELA (CPSA)

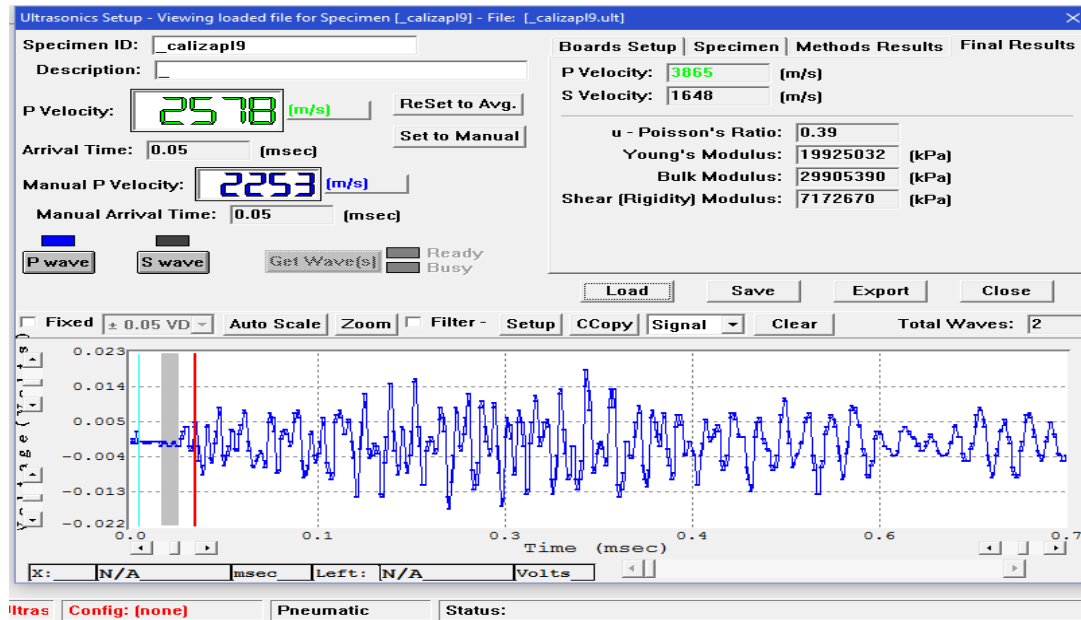
CPSA07



CPSA08

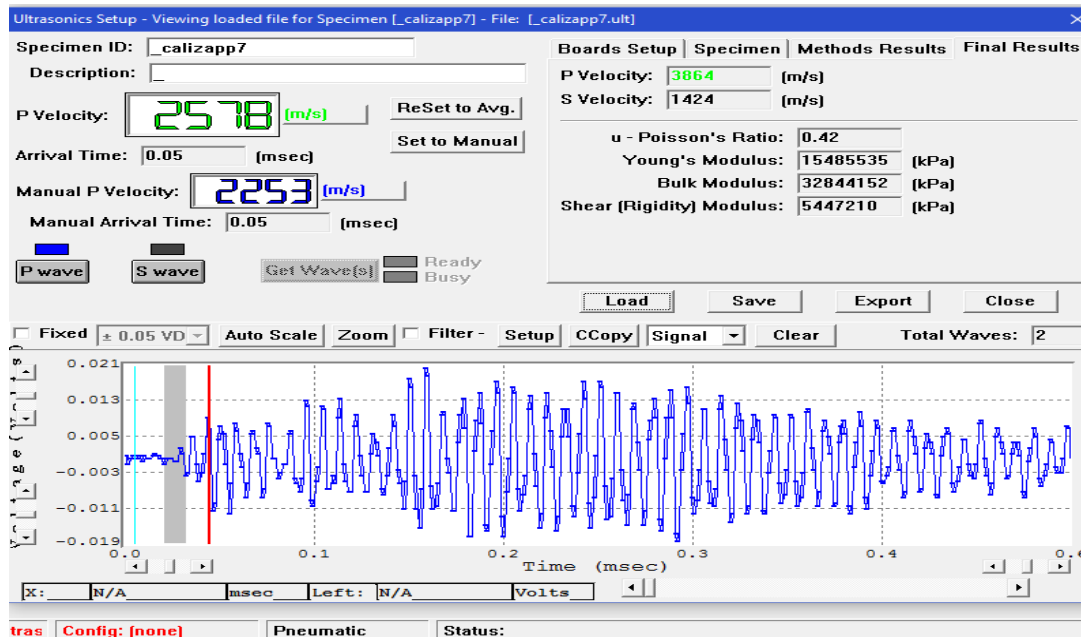


CPSA09

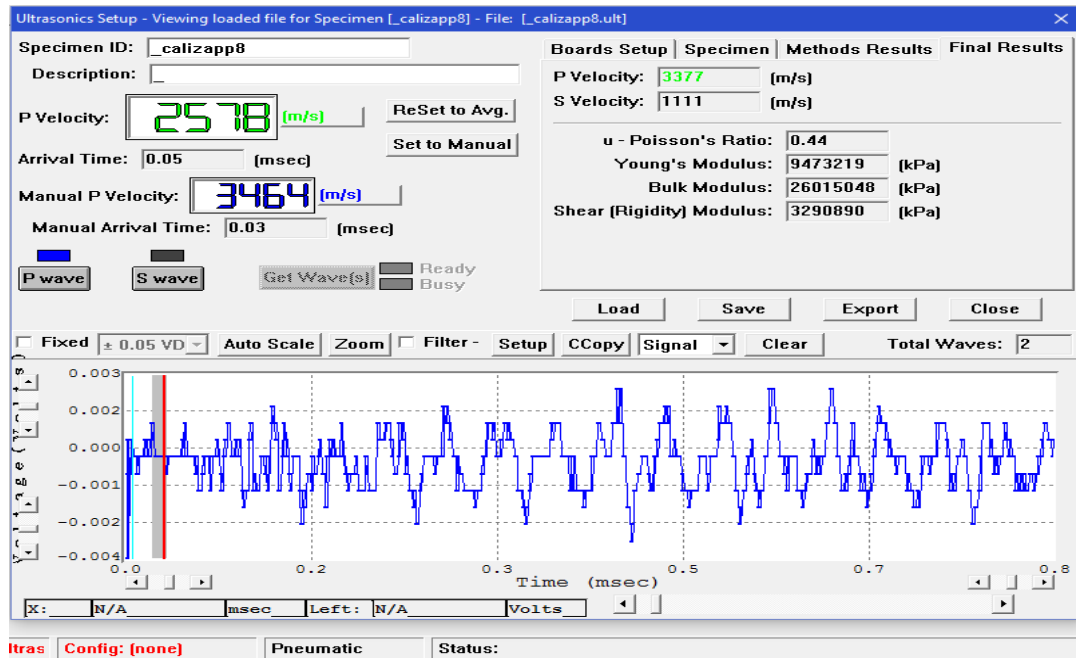


CALIZA PERPENDICULAR (CPPSA)

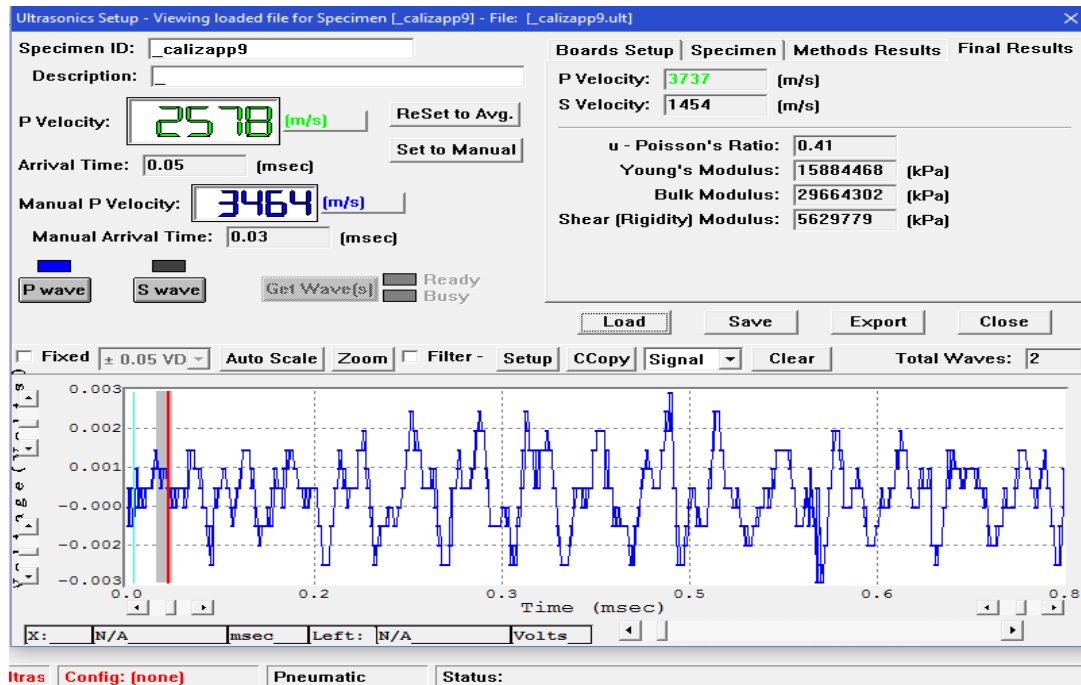
CPPSA07



CPPSA08

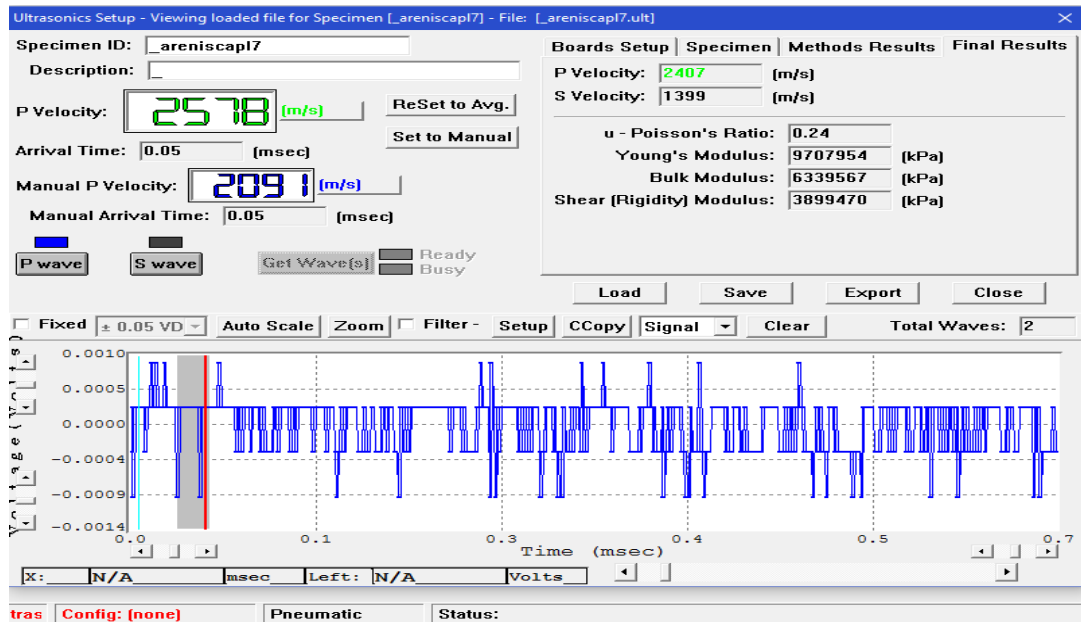


CPPSA09

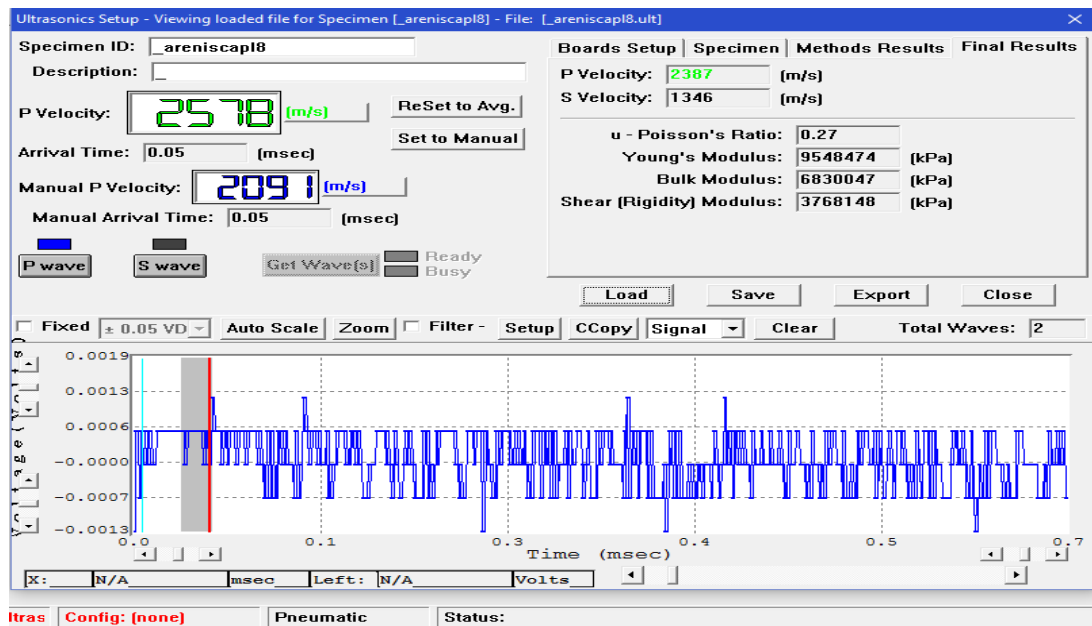


ARENISCA PARALELA (APSA)

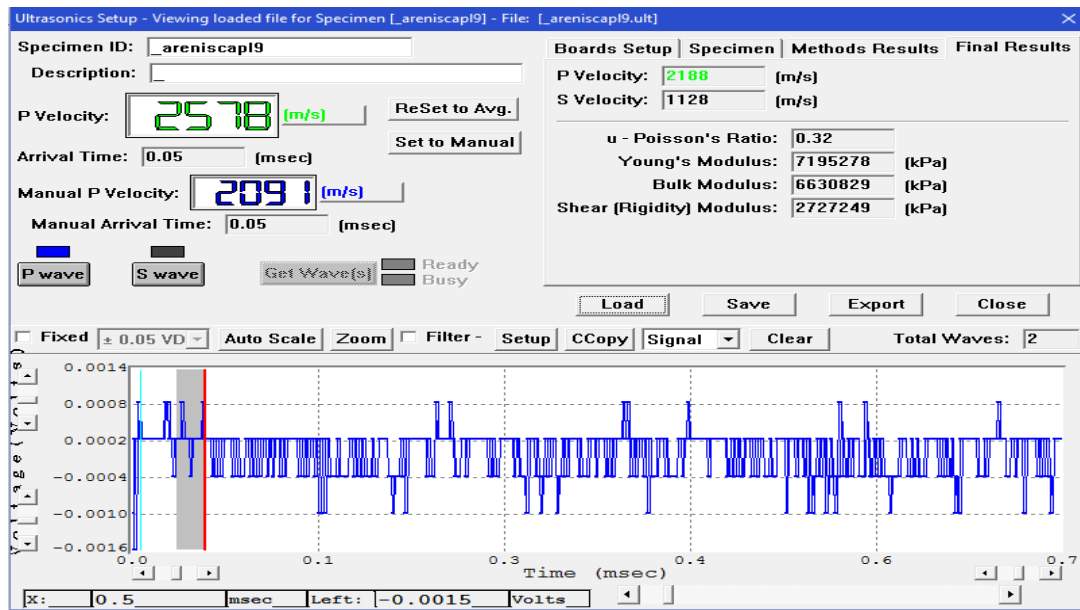
APSA07



APSA08

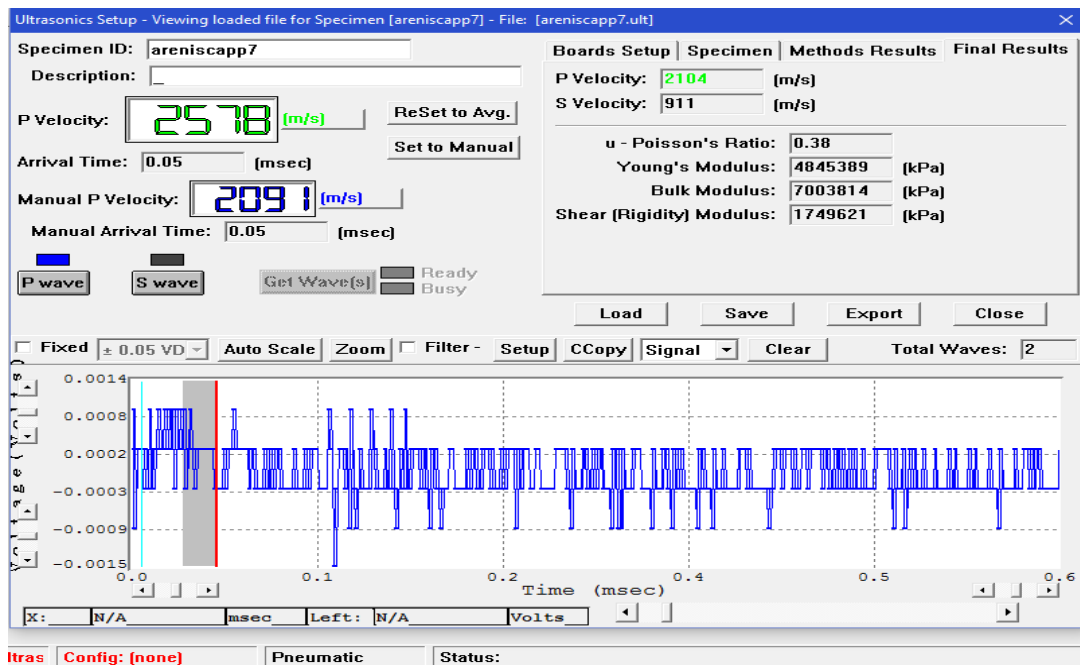


APSA09

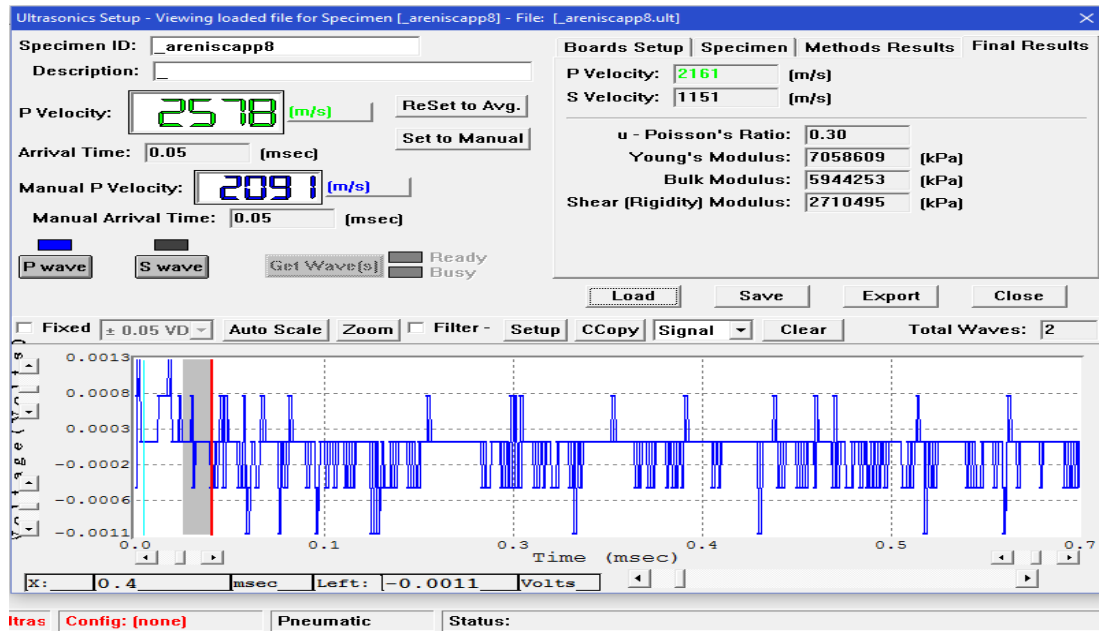


ARENISCA PERPENDICULAR (APPSA)

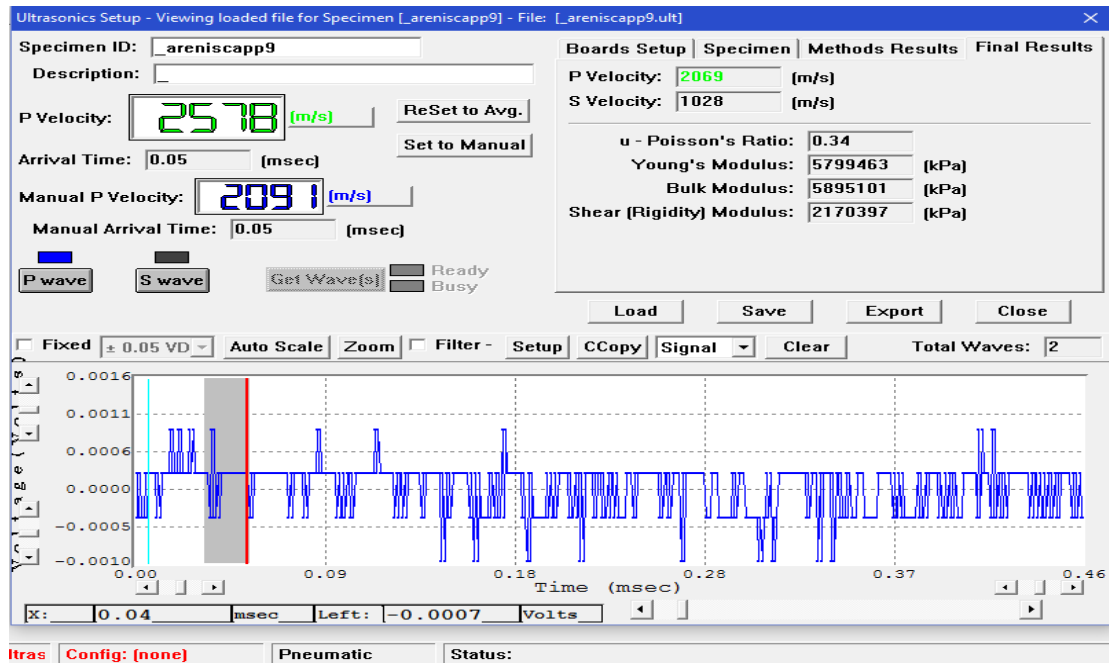
APPSA07



APPSA08

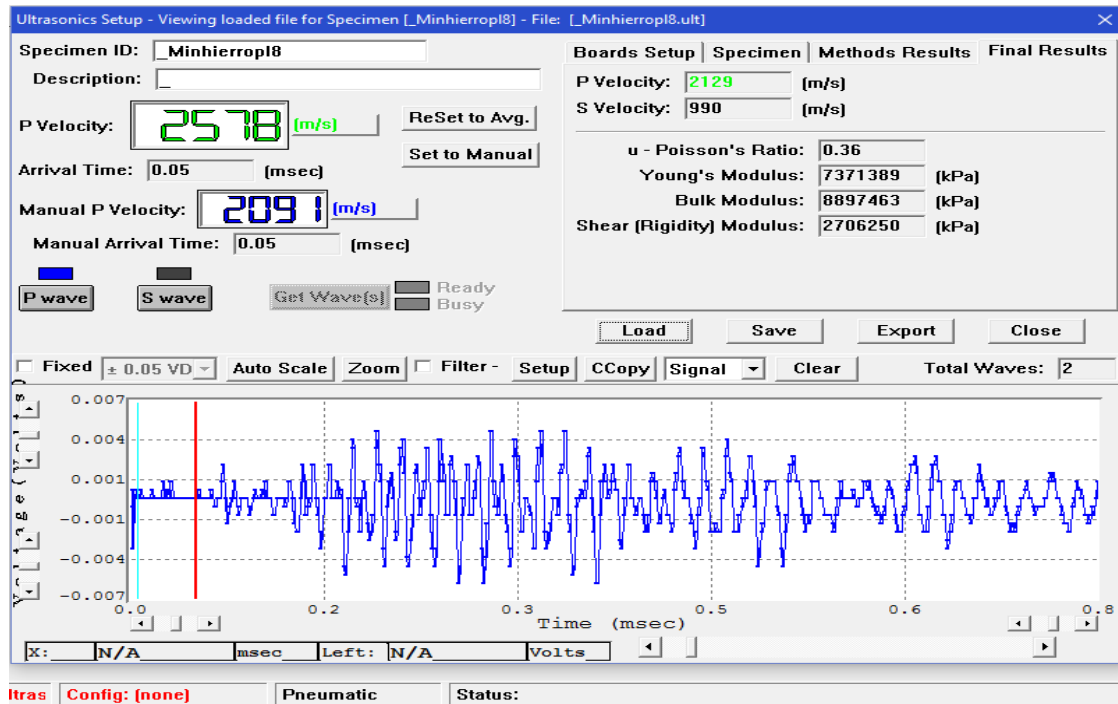


APPSA09

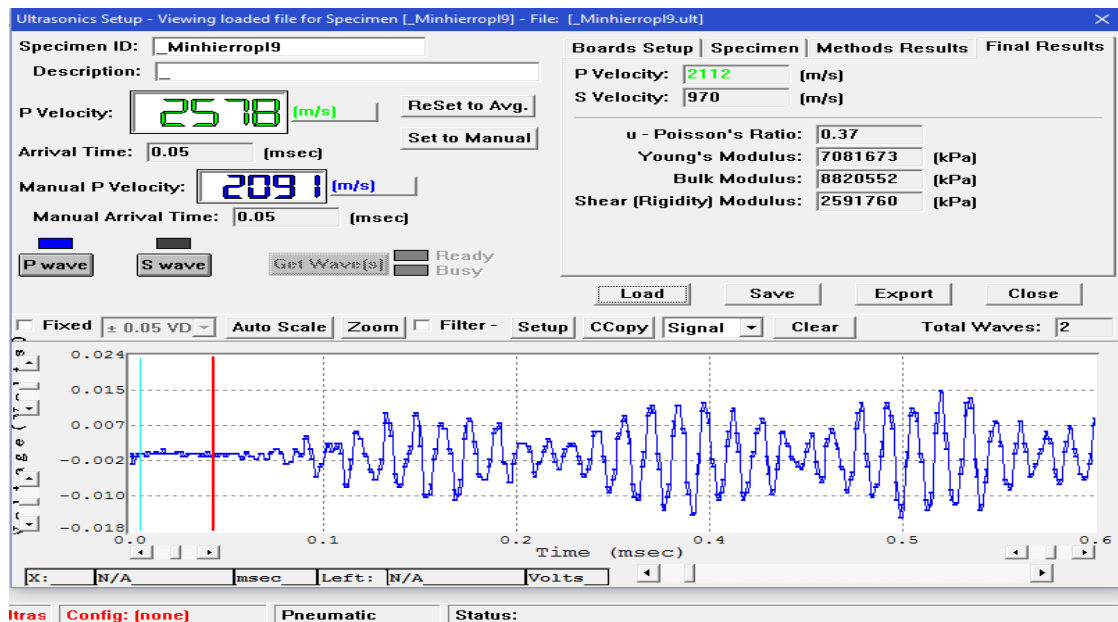


MINERAL DE HIERRO PARALELA (AFPSA)

AFPSA08

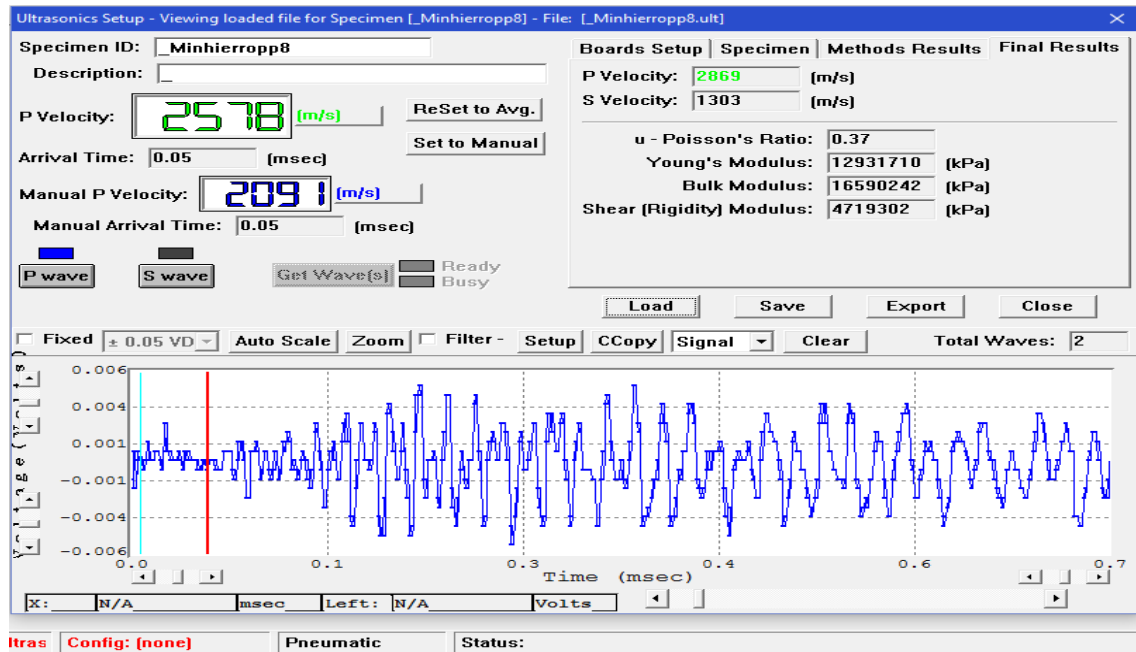


AFPSA09



MINERAL DE HIERRO PERPENDICULAR (AFPPSA)

AFPPSA08



AFPPSA09

